

Jussi Saastamoinen

# Jännitetasojen vertailu laivan sähköverkossa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

23.8.2013

Tekijä Otsikko	Jussi Saastamoinen Jännitetasojen vertailu laivan sähköverkossa
Sivumäärä Aika	51 sivua + 1 liite 23.8.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	sähkösuunnittelun ryhmänvetäjä Unto Ryyänen vanhempi suunnittelija Olavi Adamsson lehtori Sampsa Kupari
<p>Insinöörityössä tutkittiin jännitetaso valinnan merkitystä laivan sähköverkossa erityisesti taloudellisessa mielessä. Työssä käytettiin vertailun pohjana rakenteilla olevaa laivaa, jonka sähköverkko mitoitettiin uudelleen vaihtoehtoisille jännitteille. Työssä selvitettiin millainen vaikutus jännitetasolla on kaapeloinnin sekä laitteiden kustannuksiin ja minkälaiset jännitetasot tulevaisuudessa kannattaisi valita vertailulaivan kaltaiseen alukseen.</p> <p>Kaapeleiden hankintahinnat kuparin maailmanmarkkinahinnan mukaan saatiin telakan hankinnasta. Kaapelinvetokustannusten laskemisessa käytettiin hyväksi telakan aiemmin alihankintana ostaman kaapelinvetotyön keskimääräisiä hintoja. Jännitetaso vaikutusta laitekustannuksiin arvioitiin pyytämällä potentiaalisilta laitetoimittajilta tarjousta samoista laitteista eri jännitteellä.</p> <p>Työssä saatiin selville, että vertailussa käytetyn laivan jännitetasot valittiin onnistuneesti. Tosin sähköverkon kustannuksia olisi todennäköisesti pystytty pienentämään käyttämällä laivan voimalaitoksessa sekä voimanjakelussa yhteistä 690 voltin jännitetasoa, ja yksinkertaistamalla verkkoa jättämällä päätaulujen väliltä pääjakelumuuntajat pois.</p> <p>Kaapeloinnin kustannusten kannalta kuparin maailmanmarkkinahinnalla on oleellinen merkitys. Kuparin hinnan kehitystä tulisi pitää silmällä, koska se vaikuttaa jännitetasojen valintaan. Tulevaisuutta ajatellen kannattaisi myös tutkia, olisiko sähköjakeluverkkoa mahdollista yksinkertaistaa siten, että kaikki vaatimukset kuitenkin täyttyvät. Mahdollisimman yksinkertainen verkko todennäköisesti vähentää kustannuksia ja lisää toimintavarmuutta.</p>	
Avainsanat	jännitetaso, sähköjakelu, optimointi, laiva

Author Title	Jussi Saastamoinen Comparison of Voltage Levels in the Power Network of a Ship
Number of Pages Date	51 pages + 1 appendix 23 August 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Unto Rynnänen, Head of Design Group, Electrical Systems Olavi Adamsson, Senior Designer Sampsa Kupari, Senior Lecturer
<p>The purpose of this graduate study was to research the effects of choosing different voltage levels, especially from a financial point of view. A ship which is currently under construction was used as a baseline and its electric power network was resized for new alternative voltage levels. In this study, the significance of the voltage level for the cable and equipment cost was examined, and it was considered what voltage levels should be chosen in future for ships that are equivalent to the comparison vessel.</p> <p>The cable purchase prices according to copper world market price were gotten from the sourcing of the shipyard. The average subcontracting prices the shipyard has earlier paid were used in calculating the cost of the cable pulling expenses. The effect of the voltage level on the equipment cost was estimated by asking for a quotation from potential equipment suppliers.</p> <p>It was discovered that the voltage levels used in the comparison ship were chosen successfully. However, the costs would probably have decreased by choosing the same 690 volt voltage level for both the power plant and the distribution network, and making the network simpler by removing the main distribution transformers between the main distribution boards.</p> <p>An important factor for cable expenses is the copper world market price. The copper price development should be observed because it has influence on choosing the voltage levels. For future purposes, it would be worthwhile to research if the electrical network could be further simplified, while still fulfilling all the demands. Making the network as simple as possible could probably decrease expenses and increase reliability.</p>	
Keywords	voltage level, distribution of electricity, optimization, a ship

# Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Laivan sähköverkko	2
2.1	Sähköverkon rakenne	3
2.2	Luokituslaitoksen säännöt jännitetasojen suhteen	5
2.3	IEC:n suosittelemat jännitetasot	5
2.4	Laivan NB506 pääjakelukaavio	7
3	Jännitteen vaikutus sähkönjakelussa	10
3.1	Jännitteen vaikutus kaapelointikustannuksiin	11
3.2	Kaapelointiin liittyvät muut kustannukset	13
3.3	Jännitteen vaikutus moottorin syöttökaapelin valintaan	13
3.4	Vaikutus voimanjakelun laitteiden saatavuuteen	14
3.5	Vaikutus voimalaitoksen laitteiden saatavuuteen	15
4	Kuparin markkinahinnan vaikutus kaapelihintoihin	17
4.1	Kuparin hintakehitys	17
4.2	Oikea ajoitus ratkaisee	18
4.3	Riittävä aikataulu hankinnalle	19
5	Vertailun toteutus	21
5.1	Kaapelinvetotyön kustannusten arvioiminen	21
5.2	Kaapeloinnin kustannusvertailun toteutus	22
5.3	Laitteiden kustannusvertailun toteutus	23
6	Jännitetasojen vertailu	25
6.1	Voimanjakeluverkon toteutus 690 V:n jännitteellä	28
6.2	Voimalaitoksen toteutus 3,3 kV:n jännitteellä	28
6.3	Oikosulkulaskelmat	29
6.3.1	Voimanjakeluverkon oikosulkuvirrat	30
6.3.2	Voimalaitoksen oikosulkuvirrat	30

6.4	Jännitetaso vaikutus laitteiden tilantarpeeseen	32
6.5	Kaapeloinnin työkustannukset	34
6.5.1	Voimanjakelun työkustannukset	35
6.5.2	Voimalaitoksen työkustannukset	35
6.6	Kaapeloinnin materiaalikustannukset	36
6.6.1	Voimanjakelun materiaalikustannukset	36
6.6.2	Voimalaitoksen materiaalikustannukset	37
6.7	Kaapeloinnin kokonaiskustannukset	38
6.7.1	Voimanjakelun kaapelointikustannukset	39
6.7.2	Voimalaitoksen kaapelointikustannukset	40
6.8	Jännitetaso vaikutus laitekustannuksiin	41
6.8.1	Voimanjakelun laitekustannukset	42
6.8.2	Voimalaitoksen laitekustannukset	42
6.9	Jännitetaso vaikutus kokonaiskustannuksiin	43
6.9.1	Jännitetaso vaikutus voimanjakelun kokonaiskustannuksiin	43
6.9.2	Jännitetaso vaikutus voimalaitoksen kokonaiskustannuksiin	44
7	Päätaulujen toteuttaminen yhteisellä jännitteellä	46
8	Yhteenveto	49
	Lähteet	51
	Liite: Sysäyskerroin	

## Lyhenteet

DG	Diesel Generator; dieselgeneraattori
EDG	Emergency Diesel Generator; hätädieselgeneraattori
ES	Emergency Switchboard; hätäjakelutaulu
FC	Frequency Converter; taajuusmuuttaja
FiFi	Fire Fighting; vesitykki
GT	Galley Transformer; keittiömuuntaja
HDG	Harbour Diesel Generator; satamadieselgeneraattori
HF	Harmonic Filter; yliaaltosuodatin
IEC	International Electrotechnical Commission; kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio
LME	London Metal Exchange; Lontoon metallipörssi
MS	Main Switchboard; pääjakelutaulu
NPC	Neutral Point Resistor; nollapistevastus
PM	Propulsion Motor; propulsiomoottori
PS	Propulsion Switchboard; propulsiotaulu
SC	Shore Connection; maistasyöttö
SCT	Shore Connection Transformer; maistasyötön muuntaja
T	Transformer; muuntaja
TH	Thruster; ohjailupotkuri

## 1 Johdanto

Tämä insinöörityö on tehty Arctech Helsinki Shipyardille. Arctech on yksi maailman johtavista arktiseen laivanrakennukseen suuntautuneista yhtiöistä. Noin 60 % maailmalla nykyään käytössä olevista jäänmurtajista on rakennettu tällä telakalla.

Työ käsittelee laivan sähköverkon jännitetasojen valintaa sekä teknisestä että taloudellisesta näkökulmasta. Sähköllä on nykyisin laivoissa suuri merkitys, sillä lähes kaikki aluksen laitteet vaativat sähköä toimiakseen. Hyvin suunniteltu ja luotettava sähköverkko on välttämätön laivan turvallisen toiminnan kannalta. Tämä korostuu laivoissa, jotka operoivat erityisen vaativissa, kuten arktisissa olosuhteissa.

Tarjousvaiheessa on tärkeää valita laivassa käytettävät jännitetasot huolella. Hyvin valitut jännitetasot mahdollistavat toimivan sähköverkon suunnittelun pitäen samalla kustannukset kurissa. Suunnittelussa on otettava huomioon asiakkaan tarpeet ja viranomaisten määräykset.

Suunnittelun muodostuessa rutiiniksi tullaan usein siihen tilanteeseen, että se perustuu suureen määrään itsestään selviltä tuntuvia olettamuksia. Asioita tehdään tietyllä tavalla vain, koska niin on totuttu aikaisemminkin tekemään. Välillä on tärkeää pysähtyä pohtimaan, onko käytössä olevia toimintatapoja tarpeen muuttaa. Työssä tarkastellaan jännitetasojen valintaa voimanjakelu- ja voimalaitospuolella käyttäen pohjana rakenteilla olevaa laivaa, ja selvittää, mitä asioita tulee ottaa huomioon jännitetasoja valitessa.

## 2 Laivan sähköverkko

Laivan sähköverkko muistuttaa maasähköverkkoa pienoiskoossa. Laivoissa on oma sähköntuotanto, jakelu sekä omat kuluttajat. Laivan sähköverkko on täydellinen kokonaisuus, joka antaa laivalle kyvyn toimia itsenäisesti merellä riittävän pitkän ajanjakson.

Laivan tarvitsema sähkö tuotetaan konehuoneessa sijaitsevilla generaattoreilla, jotka pyörivät vakionopeudella tavallisesti dieselmoottorin voimalla. Dieselgeneraattorien määrään ja kokoon vaikuttavat laivan sähkötehon tarve. Generaattoreilta sähkö siirretään laivan päätauluhuoneeseen, josta alkaa varsinainen sähkönjakelu. Tauluhuoneessa jännite muutetaan sopivaksi, ja sähkö siirretään eri puolella laivaa sijaitseville kuluttajille. Nykyään jäätä murtavat erikoisalukset, jäänmurtajat ja risteilijät rakennetaan usein diesel-sähköisellä voimansiirrolla, jolloin potkuria pyörittävä sähkömoottori on vain yksi laivan monista kuluttajista.

Laivan sähköverkon suunnittelu eroaa maapuolen verkoista sillä, että sen rakentaminen aloitetaan tyhjästä. Maapuolella tavallisesti vain laajennetaan tai muutetaan vanhaa, jo olemassa olevaa verkkoa. Toinen iso ero on se, että verkko rakennetaan kerralla valmiiksi. Suunnittelua helpottaa, ettei tehontarve todennäköisesti kasva tulevaisuudessa merkittävästi. Toisaalta laivan sähköverkon muuttaminen tai korjaaminen jälkikäteen on usein vaikeaa ja kallista. Laivat ovat myös normaalisti jatkuvassa käytössä, jolloin yllättävät matkan keskeytymiseen johtavat viat aiheuttavat varustamoille usein suuret taloudelliset tappiot.

Laivan sähköverkolta halutaan yleisesti

- luotettavuutta
- turvallisuutta
- taloudellisuutta
- vähemmän henkilökuntaa
- enemmän automatiikkaa.



## 2.1 Sähköverkon rakenne

Helsingissä rakennetuissa laivoissa on suosittu viime vuosikymmeninä IT-järjestelmää eli ns. kelluvaa verkkorakennetta. Konehuoneessa tähtikytkeäisten generaattorien nolla kytketään laivan runkoon suuren resistanssin kautta, joka mahdollistaa maasulkuvalvonnan. Laivan sähkölaitteet ovat joko kolmivaiheisia, tai yksivaiheisia ilman nolalajohdinta. Yksivaiheiset sähkölaitteet on tavallisesti kytketty laivoissa kahden vaiheen väliin. Poikkeus löytyy kuitenkin laivan keittiöstä, jossa olevat keittiölaitteet syötetään oman nolalajohdintimella varustetun muuntajan kautta.

Kelluvan IT-järjestelmän etuina voidaan pitää, ettei sen toiminta katkea yksittäisestä maasulusta ja rungosta erotettu verkko pitää maasulkuvirrat pieninä. Negatiivisina puolina voidaan pitää korkeita eristysvaatimuksia ja mahdollisesti esiintyviä korkeita transienttiylijännitteitä. Lisäksi vuotovirtojen valvonta saattaa olla haasteellista. Syy sijoittaa keittiölaitteet oman erillisen erotusmuuntajan taakse liittyy vuotovirtojen valvontaan. Keittiölaitteiden joukossa on paljon lämpökojeita, joista yhteensä aiheutuvat vuotovirrat vaikeuttaisivat vuotovirtojen valvontaa kohtuuttomasti.

Järjestelmää jossa generaattorin tähtipiste maadoitetaan suuren impedanssin kautta laivan runkoon, käytetään valtaosassa keskijännitteisiä laivoja. Järjestelmän etuina ovat matalat maasulkuvirrat, jotka vähentävät laitteiden hajoamisen sekä tulipalon vaaraa. Myös maasulkujen aiheuttamien järjestelmän ylijännitteestä johtuvien valokaarten riski on erityisen pieni, sekä tarvittavat suojalaitteet ovat edullisia. Vaikka yksittäinen maasulku ei periaatteessa estä verkon käyttöä, on vika syytä paikantaa ja korjata viipymättä. Jos kahteen eri vaiheeseen tulee samanaikaisesti maasulku, syntyy sen seurauksena vaiheiden välinen oikosulku, jolloin laitevahingot saattavat olla isot. [1, s. 19 - 21.]

Laivan sähköverkko voidaan jakaa voimalaitospuoleen, voimanjakeluun ja valaistukseen. Voimalaitospuoli sisältää laivan generaattorit ja suurimmat kuluttajat, kuten laivan propulsiolaitteiston. Voimalaitospuolella on riittävästi kapasiteettia siirtää suuria tehoja. Voimanjakelu käsittää muut teholtaan pienemmät tyypillisesti kolmivaiheiset sähkölaitteet ja voimalaitospuolen apulaitteet. Valaistusverkko sisältää mm. valaisimet, patterit ja pistorasiat.

Laivan sähköverkon jännitteen ja taajuuden valintaan vaikuttaa laivan tuleva pääasiallinen toiminta-alue. Euroopassa käytetään 50 Hz:n taajuutta, kun taas Pohjois-Amerikassa on käytössä 60 Hz:n järjestelmä. Laivoissa yleisesti käytettyjä jännitteitä listataan taulukossa 1:

Taulukko 1. Laivoissa yleisesti käytössä olevia jännitetasoja

	Jännitetaso					
	Voimanjakelu			Voimalaitos		
Taajuus						
50 Hz	230 V	400 V	690 V	3,3 kV	6,6 kV	11,0 kV
60 Hz	120 V	440 V	690 V	3,3 kV	6,6 kV	11,0 kV

Jos laivan sähköverkossa on suuria kuluttajia, tai laivan yhteenlaskettu tehontarve on suuri, nousee sähköverkon virrat pienellä jännitteellä suuriksi. Tällöin pullonkaulaksi sähkönjakelussa muodostuu ensimmäisenä katkaisijat ja taulut, joita markkinoilla on saatavilla vain tiettyihin virta-arvoihin asti. Markkinoilla olevien pienjännitekatkaisijoiden yleinen virran yläraja on 6 300 A. Ratkaisuna virtojen nousuun on suuremman jännitetaso valitseminen. Jännitteen noston etuna on myös kaapelimassan vähentyminen. Jännitetaso noston myötä laitteiden hinnat saattavat kuitenkin nousta. Standardien mukaiset keskijännitteiset generaattorit ja moottorit eivät tosin eroa suuresti pienjännitekoneista. Vastaavasti kaapelointikustannukset tavallisesti laskevat tarvittavan kaapelin poikkipinta-alan pienentyessä. [1, s. 41 - 43.]

Laivan sähköverkkoa käytetään säteittäisenä. Tämä rajoittaa häiriöiden leviämistä, pienentää oikosulkuvirtoja ja tekee suojauksen toteuttamisesta ja jännitteensäädöstä yksinkertaisempaa kuin silmukoidussa verkossa. Verkon keskeisimmät osat joudutaan kuitenkin luokituslaitosten vaatimuksesta kahdentamaan. Tämä parantaa verkon luotettavuutta erilaisten vikatilanteiden yhteydessä. Verkon toimiessa normaalisti silmukoinnin mahdollistavia katkaisijoita pidetään tavallisesti auki. Osassa laivoja, kuten sotaluoksissa, verkkoa saatetaan kuitenkin normaalitilanteessakin käyttää rengasmaisena.

Laiva toimii merellä itsenäisesti, joten laivassa täytyy luokituslaitosten sääntöjen mukaan olla muun sähköverkon tilasta riippumatta toimiva hätägeneraattori. Generaattori on kytketty hätätaulujen kautta laivan hätäjakeluverkkoon ja se on mitoitettu antamaan normaaliverkon jännitekatkon aikana sähköä laivan tärkeimmille kuluttajille. Laivan kaikkein kriittisimmät kuluttajat, kuten merenkulkulaitteisto, on myös varmistettu

UPS-järjestelmällä (engl. Uninterruptible Power Supply). Järjestelmän tehtävänä on varmistaa kaikissa tilanteissa katkeamaton sähkönsyöttö. [2, s. 14.]

## 2.2 Luokituslaitoksen säännöt jännitetasojen suhteen

Luokituslaitokset asettavat omia rajoituksiaan verkon jännitetasoille ja taajuuksille. Tiettyjä poikkeuksia, kuten nopeita ja keveitä aluksia lukuun ottamatta Det Norske Veritas on määritellyt laivojen sähkökäyttöjen jännitetasojen tehollisarvoille seuraavat ylärajat:

- kiinteästi kaapeloidut laitteet 15 000 V
- joustavalla kaapelilla ja pistokkeella varustetut siirreltävät laitteet, joita ei pidetä käytön aikana kädessä 1 000 V
- valaistuksen syöttö (mukaan lukien merkkilamput), asuintilojen lämmittimet, 2-napaiset pistorasiat, käytön aikana kädessä pidettävät kannettavat laitteet, ohjaus-, viestintä- ja instrumentointilaitteet 250 V. [2, s. 16.]

Erityistapauksessa luokituslaitos voi kuitenkin hyväksyä korkeampia jännitetasoja.

Myös käytännön syyt pakottavat noudattamaan sääntöjen mukaisia jännitetasoja. Esimerkiksi standardien mukaisia lamppeja ei ole yleisesti saatavilla yli 250 V:n syöttöjännitteellä. Myös 15 000 V jännitteen yläraja on riittänyt tähän asti tosin, jos tulevaisuudessa rakennetaan aiempaa suurempia risteilyaluksia, saattaa tulla tarvetta ottaa käyttöön entistä korkeampia jännitetasoja. [1, s. 41.]

Det Norske Veritas -luokituslaitos määrittelee vaihtojännitteelle 500 V ylärajan, mikäli jakelujärjestelmässä käytetään nelijohdinkaapelia, jossa on kolme vaihetta ja maadoitettu nollajohdin. Tämänlaista järjestelmää käytetään laivan keittiössä. Käytännössä 400 V:n pääjännite joudutaan valitsemaan joka tapauksessa, koska se on yleinen markkinoilla olevien keittiölaitteiden käyttöjännite. [2, s. 15.]

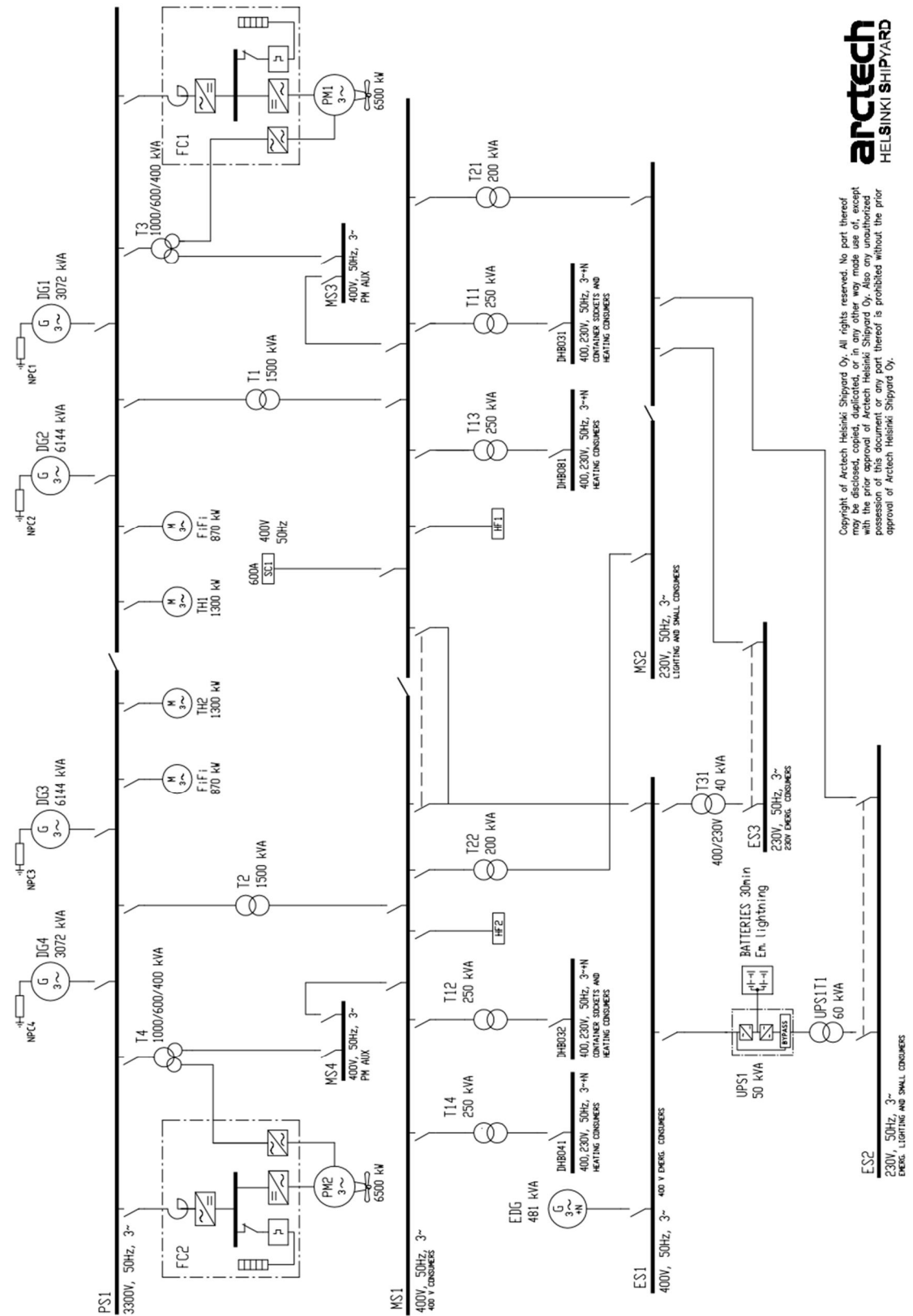
## 2.3 IEC:n suosittelemat jännitetasot

Kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio on määritellyt standardissa IEC 61892-2 taulukon 2 (ks. seur. s.) mukaiset suositetut jännitetasot ja käyttötarkoitukset.

Taulukko 2. IEC 61892-2 -standardin mukaiset jännitetasot vaihtosähkölle [1, s. 42]

<b>Vaihtosähkö jakelujärjestelmät IEC 61892-2</b>		
<b>Jännite</b>	<b>Tyyppi</b>	<b>Käyttösovellus</b>
11 kV – 3-vaihetta	tuotanto- ja jakelujännite	generaattoreiden kapasiteetti ylittää 20 MW, yli 400 kW moottoreiden suoraan käynnistykseen
6,6 kV – 3-vaihetta	tuotanto- ja jakelujännite	generaattoreiden kapasiteetti on 4–20 MW, yli 400 kW moottoreiden suoraan käynnistykseen
3,3 kV – 3-vaihetta	jakelujännite	toinen keskijännitetaso suurille kuluttajille
690 V – 3-vaihetta	tuotanto- ja jakelujännite	generaattoreiden kapasiteetti on alle 4 MW, alle 400 kW moottoreiden suoraan käynnistykseen, ensiöjännite porausmoottoreiden konverteereille
400 V – 3-vaihetta	jakelujännite	asuintilat, keittiö ja pesulan suuret kuluttajat
400/230 V TN-S	jakelujännite	valaistus, pienitehoiset yksivaiheiset alle 3 kW lämmittimet mukaan lukien lämpökaapelit
UPS 230 V IT	jakelujännite	instrumentointi, ohjaus, viestintä ja turvajärjestelmät
230 V IT	jakelujännite	varasähkön syöttöjärjestelmät
230 V TN-S	jakelujännite	hätävalaistus ja pienet kuorimat

## 2.4 Laivan NB506 pääjakelukaavio



Kuva 1. Erään Helsingin telakan rakentaman laivan pääkaavio

Kuvassa 1 (ks. ed. s.) näkyy tyypillinen huoltoaluksen pääkaavio. Kyseessä on noin 100 metriä pitkä laiva, jonka dieselsähköiseen potkurikoneistoon kuuluu kaksi Azipod-ruoripotkurisyksikköä. Laivan 50 Hz:n sähköverkko koostuu 3,3 kV:n keskijänniteverkosta, 400 V:n voimanjakeluverkosta ja 230 V:n valaistusverkosta. 18 MW kokonaistehon tuottaa kaksi 6 144 kVA:n ja kaksi 3 072 kVA:n dieselgeneraattoria (DG1–4). Laivan sähköjärjestelmä on IT, ja verkko on erotettu rungosta lukuun ottamatta generaattorien tähtipisteitä, jotka on kytketty laivan runkoon suurten vastusten kautta (NPC1–4).

Päägeneraattorit on kytketty laivan 3,3 kV:n keskijänniteverkkoon, johon myös laivan suurimmat kuluttajat on kytketty. Kulloinkin käytössä olevien dieselgeneraattoreiden määrän ratkaisee senhetkinen tehon tarve. Laivan suurimmat kuluttajat ovat kaksi 6 500 kW:n potkurimoottoria (PM1 ja PM2). Moottorit on kytketty keskijänniteverkkoon 7 000 kVA taajuusmuuttajan kautta (FC1 ja FC2). Taajuusmuuttajien avulla potkurien pyörimisnopeutta on mahdollista säätää tarkasti. Taajuusmuuttajat kuitenkin aiheuttavat 3,3 kV:n verkkoon paljon yliaaltoja, jotka huonontavat sähkönlaatua. Potkurimootto-reiden magnetoinnille ja apulaitteille sähköä syötetään 400 V:n jännitteellä omien muuntajien kautta (T3 ja T4).

Keskijänniteverkkoon on kytketty myös kaksi 1 300 kW:n tehoista keulapotkuria (TH1 ja TH2) sekä kaksi 870 kW:n tehoista vesitykkiä (FiFi). Kytkemällä nämä moottorit keskijänniteverkkoon niiden vaatima teho saadaan siirrettyä pienemmillä kaapeleilla, eikä suurta tehoa tarvitse siirtää muuntajien läpi. Esimerkkitapauksessa näiden moottorien käynnistysvirtaa ei rajoiteta, joten ne aiheuttavat suuren käynnistysvirtapiikin verkkoon. Tämänlaista toimintatapaa käytettäessä tulee suunnitteluvaiheessa varmistaa, ettei käynnistysvirta aiheuta verkkoon liian suurta jännitteen alenemaa.

3,3 kV:n jännitetasosta sähkö muutetaan 400 V:n jännitteeksi kahdella 1 500 kVA:n muuntajalla (T1 ja T2). 400 V:n jännitetaso muodostaa laivan voimanjakeluverkon, johon on kytketty laivan isommat kuluttajat ja voimalaitoksen apulaitteet. MS1-taulun kautta sähkö jaetaan mm. koneiston apulaitteille, ilmastoinnille, kansilaitteille ja lastinkäsittelylaitteille. Muuntajat T1 ja T2 vähentävät 3,3 kV verkon yliaaltojen pääsyä 400 V:n voimanjakeluverkkoon, mutta silti yliaaltojen määrää voimanjakeluverkossa vähennetään lisäksi kahden yliaaltosuodattimen (HF1 ja HF2) avulla. Yliaaltosuodattimet on asennettu 400 V:n tasoon, koska 3,3 kV:n verkkoon sopivat suodattimet tulisi huomattavasti kalliimmiksi. Verkossa on lisäksi useita pienempiä 400/230 V:n muuntajia, joiden kautta syötetään valaistusta, lämmitystä ja pistorasioita.

Hätäjakeluverkkoon on kytketty erillisen hätätaulun (ES1) kautta laivan hätägeneraattori (EDG). 481 kVA:n teholla hätägeneraattori pystyy tarvittaessa syöttämään sähköä laivan tärkeimmille kuluttajille. Laivan varasähköjärjestelmään on myös liitetty UPS-järjestelmä, joka vastaa sähkökatkon aikana kaikkein kriittisimpien kuluttajien sähkönsyötöstä, kunnes hätägeneraattori käynnistyy. Kun ollaan satamassa, voimanjakeluverkkoon on mahdollista syöttää sähköä maistasyötön (SC1) kautta.

Luotettavuuden parantamiseksi osa verkosta on kahdennettu ja päätaulut jaettu sähköisesti kahteen erilliseen osaan. PS1-taulun välikatkaisija on normaalisti suljettu, kun taas MS1- ja MS2-taulujen välikatkaisijat ovat normaalitilanteessa auki. Mikäli päätauluihin (PS1 tai MS1) tai yksittäiseen muuntajaan tulisi vikaa, jaettu rakenne mahdollistaa sähkönsyötön jatkamisen ehjän puoliskon kautta. Tämän ansiosta mikään yksittäinen vika ei tee laivaa täysin toimintakyvyttömäksi.

### 3 Jännitteen vaikutus sähköjakelussa

Käytettävällä jännitteellä on suuri merkitys sähkön siirrossa. Käyttämällä korkeampaa jännitettä pystytään siirtämään suurempia tehoja ja siirrettävät etäisyydet voivat olla pidempiä. Korkeamman jännitteen ansiosta myös sähkön siirtohäviöt pienenevät merkittävästi. Jännitetason nostaminen lisää verkon siirtokapasiteettia kriteereistä riippuen joko lineaarisesti tai neliöllisesti. Asiaa havainnollistetaan taulukossa 3, käyttäen esimerkkinä Prysmianin laivoihin tarkoitettua 150 mm<sup>2</sup>:n keskijännitekaapelia.

Taulukko 3. FE4H1M1AM1-kaapelin (1 x 150 mm<sup>2</sup>) siirtokyky eri jännitetasoilla

Jännitetaso	a	b	c
[kV]	[MW]	[km]	[%]
3,3	2,1	5,3	100
6,6	4,2	21,2	25
11,0	7,0	58,8	9

- a) Terminen kuormitettavuus.
- b) Suurin mahdollinen siirtoetäisyys pistekuormalle 2 MVA, kun sallittu jännitteen alenema on 10 %.
- c) Pituusyksikköä kohti syntyvät tehohäviöt samalla kuormituksella, kun merkitään 3,3 kV:n jännitteellä syntyviä häviöitä 100 %:lla.

Laivan sähköverkossa siirrettävät etäisyydet ovat lyhyitä, korkeintaan muutamia satoja metrejä. Siirtoetäisyyden kasvu ei siis ole oleellinen tekijä. Laivan verkoissa tulee myös harvoin ongelmia jännitteen aleneman vuoksi. Kaapeleista loppuu tavallisesti virrankes- toisuus, ennen kuin jännitteen alenema kasvaa haitallisen suureksi. Taulukon oleellisin tieto on siis termisen kuormitettavuuden kasvu, joka lisääntyy lineaarisesti jännitettä nostettaessa. Tästä syystä pienempää jännitettä käytettäessä joudutaan valitsemaan poikkipinta-alaltaan suuremmat kaapelit. Kaapelit tulee mitoittaa siten, että ne kestävät virran aiheuttaman lämpenemän.

Oleellinen termiseen kuormitettavuuteen liittyvä etu jännitetason nostossa on häviöiden pieneneminen. Siirtohäviöt ovat riippuvaisia virrasta, joka tehon pysyessä samana riip- puu lineaarisesti jännitteestä. Virta vaikuttaa syntyviin häviöihin neliöllisesti. Kun virta samassa kaapelissa kaksinkertaistuu, häviöt nelinkertaistuvat. Huomion arvoinen



yksityiskohta korkeampaa jännitetasoa valittaessa on oikosulkuvirtojen aleneminen. Käytettäessä korkeampaa jännitettä verkon impedanssi muodostuu korkeammaksi, joka rajoittaa oikosulkuvirrat pienemmiksi.

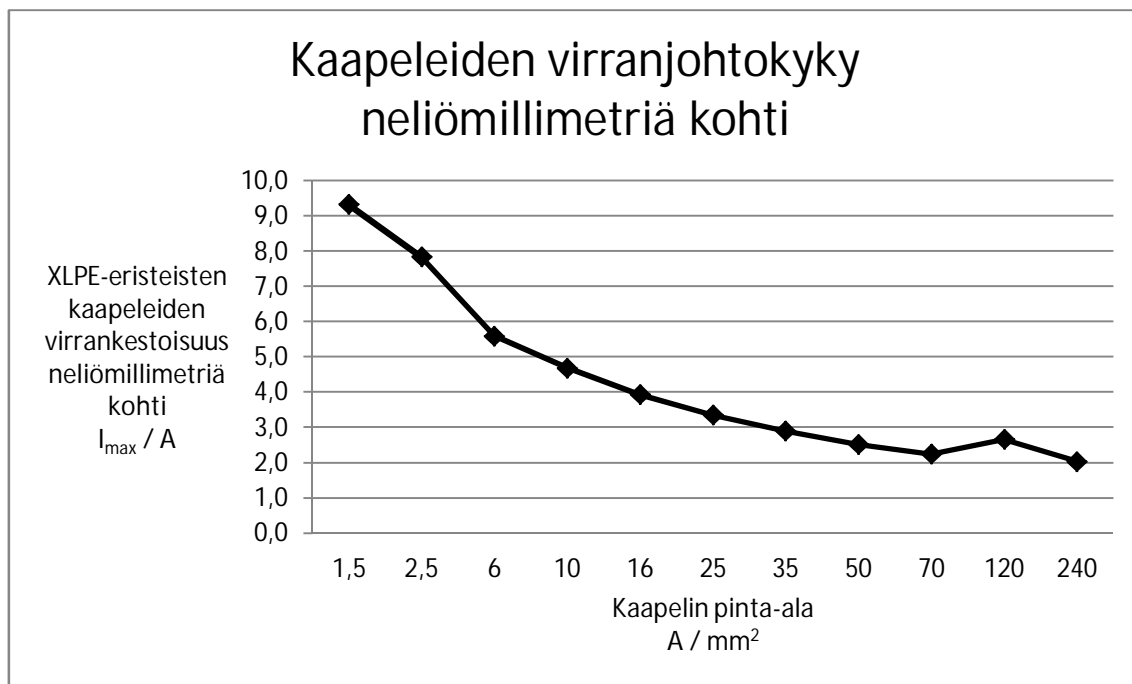
### 3.1 Jännitteen vaikutus kaapelointikustannuksiin

Halutun tehon pysyessä vakiona, jännite vaikuttaa lineaarisesti tarvittavaan virran määrään. Virran kasvaessa tarvitaan suurempi poikkipinta-alasta kaapelia. Kaapelin poikkipinta-ala ei kuitenkaan vaikuta lineaarisesti kaapelin virrankestoisuuteen. Virta aiheuttaa kaapelissa lämpiämistä, jolloin liian lämmön tulee johtua kaapelista pois. Paksumpi kaapeli ei kuitenkaan jäähdy yhtä hyvin kuin ohuempi kaapeli, joten paksu kaapeli ei kestä yhtä suurta virtaa neliömillimetriä kohti.

Taulukko 4. Samaa tyyppiä olevien 120 mm<sup>2</sup> ja 240 mm<sup>2</sup> -kaapeleiden virrankestoisuus

Kaapelin tyyppi	I / A
PN 1x120	320
PN 1x240	490

Taulukosta 4 selviää, että esimerkkitapauksessa poikkipinta-alan kaksinkertaistaminen kasvattaa kaapelin virrankestoisuutta ainoastaan 53 %. Kaapelien hinnat riippuvat merkittävästi niihin käytetyn kuparin määrästä. Kun materiaalien pysyessä samana kaapelin poikkipinta-ala kaksinkertaistuu, myös kaapelin hinta kasvaa lähes samassa suhteessa. Kaapelien hinnat riippuvat hyvin pitkälti sen hetkisestä kuparin maailmanmarkkinahinnasta. Kuvassa 2 (ks. seur. s.) vertaillaan telakalla yleisesti käytettyjen kaapelikokojen virrankestoisuutta yhtä neliömillimetriä kohti.



Kuva 2. Kaapelin suurin sallittu virta neliömillimetriä kohti

Kuvasta 2 käy ilmi, että pienempi poikkipinta-alaiset kaapelit ovat hyötysuhteeltaan parempia. Tästä syystä kannattaa myös harkita suurempi poikkipinta-alaisen kaapelin korvaamista useammalla pienempi poikkipinta-alaisella. Esimerkiksi kahdella  $3 \times 35 \text{ mm}^2$ :n kaapelilla on parempi virran siirtokyky kuin yhdellä  $3 \times 70 \text{ mm}^2$ :n kaapelilla, vaikka kaapelien yhteenlaskettu poikkipinta-ala on molemmissa tapauksissa sama. Kuvan kaapelit ovat  $70 \text{ mm}^2$ :iin asti monijohtimisia ja  $120 \text{ mm}^2$ :n sekä  $240 \text{ mm}^2$ :n kaapelit ovat yksijohtimisia. Tämä selittää  $1 \times 120 \text{ mm}^2$  kaapelin paremman hyötysuhteen verrattuna  $3 \times 50 \text{ mm}^2$ :n ja  $3 \times 70 \text{ mm}^2$ :n kaapeleihin. Erityisesti keskijännitteellä tulee kuitenkin ottaa huomioon kaapelipäätteiden kustannukset. Käyttämällä paksuja kaapeleita, niiden pienemmän lukumäärän myötä päätteitä tulee vähemmän.

Yleisesti pienjännitevoimakkaapeliin jännitekestoisuus on  $1\,000 \text{ V}$ . Käytettäessä  $400 \text{ V}$ :n tai  $690 \text{ V}$ :n jännitettä kaapelit ovat eristykseltään samanlaisia. Suuremmalla jännitteellä virta on pienempi, joten käyttämällä  $690 \text{ V}$ :n jännitettä voidaan kaapelointikustannuksia pienentää. Kaapelien  $1\,000 \text{ V}$ :n jännitekestoisuutta kannattaa siis käyttää mahdollisuuksien mukaan hyväksi. Vertailtaessa pienjännitettä ja suurjännitettä tilanne ei ole yhtä selkeä. Esimerkiksi  $3,3 \text{ kV}$ :n jännite vaatii eristykseltään kalliimmat kaapelit kuin pienjännite. Lisäksi keskijännitteellä kaapeleiden päätteille on omat korkeammat vaatimukset.

### 3.2 Kaapelointiin liittyvät muut kustannukset

Laivan kaapeloinnin aiheuttamat kustannukset eivät rajoitu ainoastaan kaapeleiden materiaalikustannuksiin, kaapelinvedon työkustannuksiin ja päätteiden aiheuttamiin kustannuksiin. Kaapeloinnin mahdollistamiseksi laivoissa täytyy olla kaapeleita varten tehdyt kaapelireitit, jotka sisältävät mm. kaapelikuiluja, läpivientejä ja suuren määrän kaapelirataa. Lopuksi kun kaapelit on vedetty, ne pitää vielä kiinnittää kaapeliradalle oikeanlaiseen muotoon. Kiinnityksen lisäksi kaapeliratojen läpiviennit tulee pakata vesitiiviin laipioikannen alapuolella sekä vesi- että palotiiviiksi ja yläpuolella vähintään palotiiviiksi. Läpiviennit on toteutettu sertifioituilla vesitiiviillä läpiviennillä. Ratkaisu on yksinkertainen, mutta hinnakas.

Kaapeloinnin vaatimia muita kustannuksia olisi todella vaikea arvioida tarkasti, joten niitä ei ole otettu huomioon tässä työssä. Kaapeloinnin määrällä on kuitenkin yhteys näihin kustannuksiin, koska kaapelimäärän kasvaessa kasvaa myös kaapeliratojen, läpivientien, metallityön sekä kaapeleiden kiinnityksen tarve. Kaapelimäärän lisääntyminen kasvattaa myös yleisesti tilan tarvetta. [1, s. 43.]

### 3.3 Jännitteen vaikutus moottorin syöttökaapelin valintaan

Moottorit muodostavat laivan apukäyttöjen tehontarpeesta suurimman osan. Suurempaa jännitettä käytettäessä moottoreiden syöttökaapeleiksi voitaisiin valita pienemmät ja halvemmat kaapelit. Taulukossa 5 (ks. seur. s.) esitetään moottorin ottama virta sekä sopiva syöttökaapeli 400 V:n ja 690 V:n jännitteillä. Taulukossa on käytetty tehokertoimen arvoa 0,8 ja hyötysuhteena 95 %.

Taulukko 5. Moottorin verkosta ottama virta ja sopiva syöttökaapeli 400 V:n ja 690 V:n jännitteillä

Moottorin teho P / kW	Virta 400 V I / A	Kaapeli 400 V mm <sup>2</sup>	Virta 690 V I / A	Kaapeli 690 V mm <sup>2</sup>
1,5	2,8	3x1.5	1,7	3x1.5
3	5,7	3x1.5	3,3	3x1.5
7,5	14,2	3x2.5	8,3	3x1.5
15	28,5	3x6	16,5	3x2.5
22	41,8	3x16	24,2	3x6
30	57,0	3x25	33,0	3x10
37	70,3	3x25	40,7	3x16
45	85,5	3x35	49,5	3x16
55	104,5	3x50	60,6	3x25
75	142,4	2x(3x25)	82,6	3x35
90	170,9	2x(3x35)	99,1	3x50
110	208,9	2x(3x50)	121,1	3x70
132	250,7	3x(1x120)	145,3	2x(3x35)
160	303,9	3x(1x120)	176,2	2x(3x50)
200	379,8	3x(1x240)	220,2	3x(1x120)
250	474,8	3x(1x240)	275,2	3x(1x120)
315	598,2	3x2x(1x120)	346,8	3x(1x240)
400	759,7	3x2x(1x240)	440,4	3x(1x240)

Taulukosta 5 näkyy, että kaikkein pienitehoisimpien moottoreiden kohdalla jännitteellä ei ole merkitystä kaapelin valintaan. Myös 400 V:n jännitteellä pienin saatavilla oleva kaapeli riittää syöttämään moottoria. Kun tarkastellaan suurempitehoisia moottoreita, huomataan että 690 V:n jännitteellä pystytään valitsemaan poikkeuksetta pienempi kaapeli. Joissain tapauksissa tarvittava kaapelipinta-ala on alle 50 % verrattuna siihen, että sama teho syötettäisiin 400 V:n jännitteellä.

Syöttämällä 3 000 kW:n keulapotkuria 690 V:n jännitteellä tarvitaan 15 kappaletta 3x95 mm<sup>2</sup>:n kaapeleita tai 18 kappaletta 1x240 mm<sup>2</sup>:n kaapeleita. Käyttämällä 6,6 kV:n jännitettä moottorin syöttämiseen tarvittava virta jäisi alle 300 A:n ja syöttö voitaisiin hoitaa yhdellä 3x185 mm<sup>2</sup>:n keskijännitekaapelilla. Valitsemalla keskijännite tilan tarve ja kaapeleiden paino vähenisi huomattavasti. Tämä säästäisi myös rahaa ja tekisi asentajien työstä helpompaa. [1, s. 43.]

### 3.4 Vaikutus voimanjakelun laitteiden saatavuuteen

Pienjännitteistä 400 V:n ja 690 V:n jännitteet ovat hyvin yleisiä. Laitteiden saatavuus molemmille jännitetasoille on yleisesti hyvä. Usein jopa samaa moottoria voidaan käyttää kytkentää vaihtamalla kummallakin eri jännitteellä. Pienjännitemoottorit toimivat

tavallisesti 400 V:n jännitteellä käyttämällä D-kytkentää ja 690 V:n jännitteellä Y-kytkennällä. Kaikkein pienitehoisimmissa moottoreissa tietyt mallit ovat kuitenkin tarkoitettu käytettäväksi joko 230 V:n tai 400 V:n jännitteellä. Joten hankittaessa pienitehoista moottoria 690 V:n verkkoon, tulee varmistua että valitaan sellainen moottorimalli, johon kyseinen jännite soveltuu käytettäväksi.

690 V:n jännite on yleinen teollisuudessa, joten moottoripohjaisia laitteita löytyy hyvin myös tällä jännitteellä. Laivoissa on kuitenkin paljon laitteita, jotka eivät ole yleisiä teollisuudessa. Tällaisia ovat mm. keittiölaitteet. Kaikkia laitteita ei ole mahdollista saada 690 V:n jännitteellä, joten laivaan joudutaan joka tapauksessa rakentamaan lisäksi 400 V:n jännitetaso. Keittiölaitteet sijoitetaan kuitenkin oman erotusmuuntajan taakse, joten 690 V jännitteen muuntaminen 400 V:n tasoon ei vaadi ylimääräistä muuntajaa. Yleisesti 690 V:n jännite aiheuttaa pienen ylimääräisen epävarmuustekijän laitteiden hankinnan kannalta verrattuna 400 V:n jännitteeseen.

### 3.5 Vaikutus voimalaitoksen laitteiden saatavuuteen

Voimalaitoksen jännitteen valintaan määrittelee raamit potkurimoottoreiden laitetoimittaja. Laitetoimittaja suosittelee tietyn tehoisen moottorin myötä käytettäväksi tiettyä voimalaitosjännitettä. Voimalaitoksen jännitteen valintaan vaikuttaa erityisesti laivassa käytettävät taulut, joiden katkaisijoita on saatavilla ainoastaan tiettyyn virta-arvoon asti. Laivoissa, jotka eivät ole risteilyaluksia, oleellinen tekijä tehon, ja sitä kautta virran määräytymisen kannalta ovat laivan potkurimoottorit. Potkurimoottorit ovat tavallisesti laivan suurimmat kuluttajat, joten laivan tehontarve määräytyy niiden mukaan. Laivan voimalaitokselle sopivaa jännitettä voidaan arvioida esimerkiksi ABB:n myynnin suositusten mukaan. Suositukset ovat taulukon 6 mukaiset.

Taulukko 6. ABB:n myynnin suositukset käytettävälle voimalaitosjännitteelle potkuritehon mukaan

Yksittäisen moottorin teho	Suosittelava käyttöjännite
P / MW	U / V
0–4,5	690
4,5–7,5	3 300
>7,5	6 600

Taulukosta 6 selviää, että pienimmille tehoille ABB suosittaa käytettäväksi pienjännitettä. Kun potkurimoottorin teho on välillä 4,5–7,5 MW, suositus on 3,3 kV. Yli 7,5 MW tehon syöttämiseen suositellaan 6,6 kV:n jännitettä. Suositetut jännitteet ovat suuntaa antavia, mutta ne toimivat suunnittelussa hyvänä ohjenuorana. Taulukkoa voidaan käyttää hyväksi arvioitaessa mahdollisia eri vaihtoehtoja voimalaitoksen jännitteeksi.

Tietyissä tapauksissa saattaa olla perusteltua käyttää voimalaitoksessa potkurimootto-reita korkeampaa jännitettä. Jos potkurimoottoria ei ole mahdollista hankkia voimalaitoksen kanssa samalla jännitteellä, joudutaan moottoreiden jännitettä pudottamaan erillisten muuntajien avulla. Ylimääräiset muuntajat nostavat kustannuksia ja vievät tilaa, joten ratkaisua tulee mahdollisuuksien mukaan pyrkiä välttämään.

## 4 Kuparin markkinahinnan vaikutus kaapelihintoihin

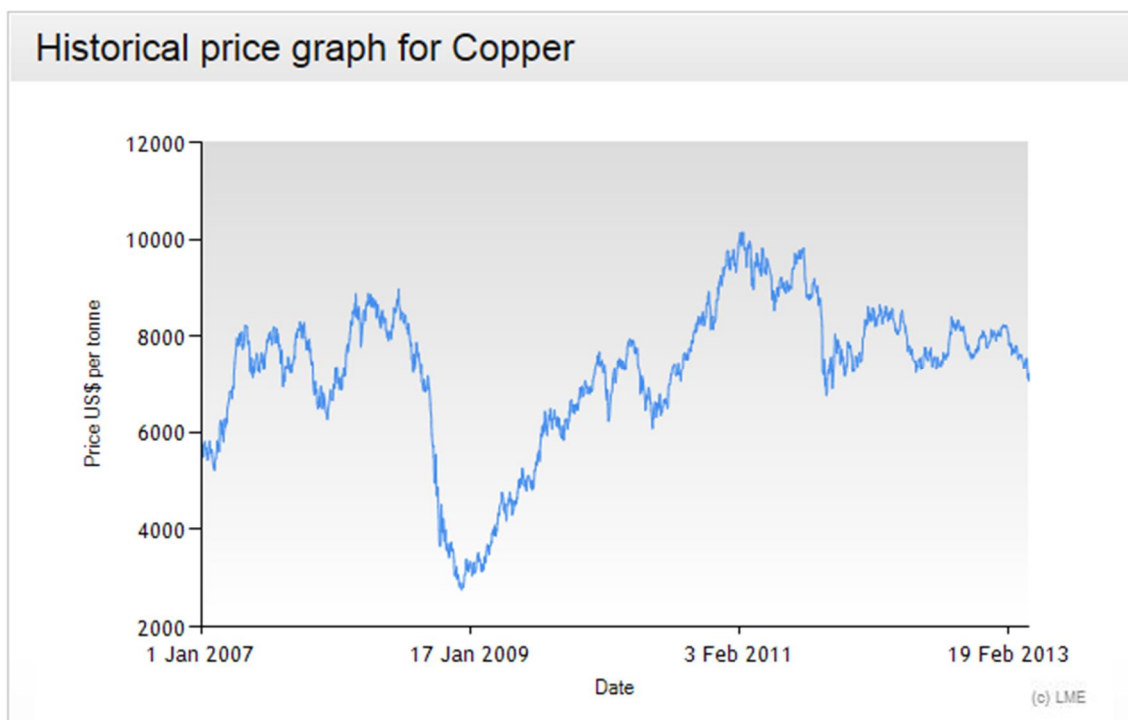
Kuparin maailmanmarkkinahinta määrää kaapeleiden hintatason. Kupari on välttämättömän raaka-aine kuparikaapeleiden valmistuksessa, ja sitä kuluu kaapeleihin suuria määriä. Yhden laivan kaapeleihin kuluu kuparia kymmeniä, jopa satoja tonneja. Kuparin markkinahinta määräytyy maailman metallipörssien mukaan, ja se noteerataan mm. Lontoon pörssissä (LME). Kuparin markkinahinta on eri kaapelitoimittajille sama, eikä siinä voida kilpailla. Tästä syystä hintakilpailu eri valmistajien välillä keskittyy kaapeleiden eristeisiin.

Kaapeleiden hankinta telakalla lähtee siitä, että tehdään arvio kaapeleiden menekistä. Kaapeleiden menekkiä voidaan arvioida aiempien vastaavanlaisten laivojen toteutuneiden kaapelimenekkien avulla. Tuleva kaapelitarve on tärkeä tieto, jotta voidaan tilata kerralla mahdollisimman iso osa tarvittavista kaapeleista. Kaapeleita tilattaessa tilaus sidotaan senhetkiseen kuparin markkinahintaan, jolloin kuparin markkinahinnan mahdolliset muutokset eivät enää vaikuta tilauksen hintaan.

Kun suuri kaapelitilaus pystytään tekemään hyvissä ajoin, voidaan valita edullisin toimittaja, eikä mahdollisesta pitkästä toimitusajasta ole haittaa. Kaapeleiden todellinen menekki tarkentuu sitä mukaa, kun suunnittelu etenee ja laivan rakentaminen aloitetaan. Kun kaapeleita joudutaan tilaamaan myöhäisemmässä vaiheessa, nousee tärkeimmäksi kriteeriksi usein kaapeleiden nopea toimitusaikataulu. Tästä syystä kaapeleita ei välttämättä ole enää mahdollista hankkia parhaaseen mahdolliseen hintaan edullisimmalta toimittajalta.

### 4.1 Kuparin hintakehitys

Kuparin maailmanmarkkinahinta on vaihdellut todella voimakkaasti viimeisen viiden vuoden aikana. Erittäin nopeasta hinnan vaihtelusta kertoo se, että maailmanmarkkinahinta nousi kahden vuoden aikana aikavälillä tammikuu 2009 ja helmikuu 2011 3,5-kertaiseksi. Kuparin hinta on viime vuosina vaihdellut nopeasti jopa kuukausittain. Kuva 3 (ks. seur. s.) esittää kuparin hinnan muutoksia aikavälillä tammikuu 2007 ja helmikuu 2013. Pörssin hinta kertoo, kuinka monta dollaria maksaa yksi kuparitonni.



Kuva 3. Kuparin \$/t-markkinahinnan kehitys Lontoon pörssissä aikavälillä 2007–2013

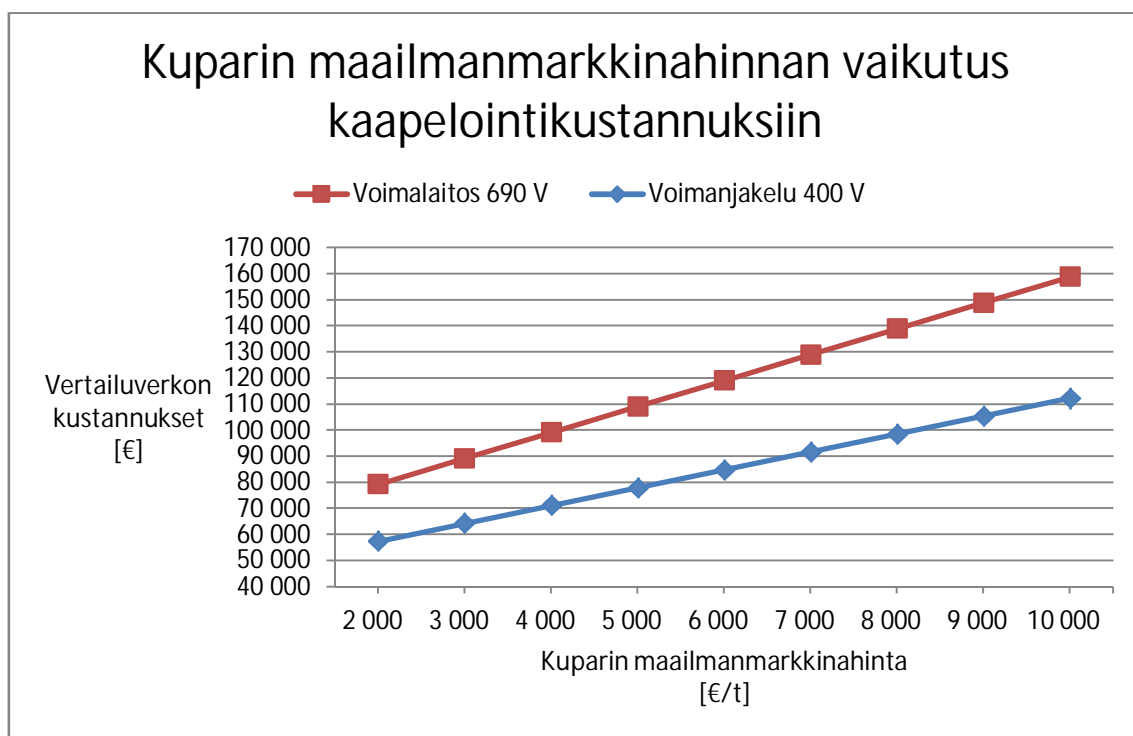
Kuparin hinta muodostuu monesta eri tekijästä, joten hinnan kehitystä on vaikea arvioida pidemmällä aikavälillä. Odotettavissa kuitenkin on, että kuparin hinta tulee vaihtelevaan voimakkaasti tulevaisuudessakin. Kuparin hinnan nopeat vaihtelut aiheuttavat telakalle ylimääräisen epävarmuustekijän. Vähentämällä kuparin tarvetta sen hinnan vaihtelun merkitys pienenee.

#### 4.2 Oikea ajoitus ratkaisee

Kuparia ostettaessa sen hetkiselä markkinahinnalla on kaapelikustannusten kannalta suuri merkitys. Hinta vaihtelee lyhyellä aikavälillä paljon, joten kuparia varattaessa on mahdollista joko voittaa tai hävitä paljon. Jotta kuparin osto voitaisiin ajoittaa edullisen hintatason aikaan, on tärkeää, ettei hankintaa tarvitse tehdä kiireessä. Tilaus täytyy lähettää valmistajalle siten, että valmistajalla on aikaa toimittaa kaapelit tarvepäivään mennessä. Tilanne on erityisen huono silloin, kun tieto kaapelin menekistä tulee liian myöhään ja kaapelitilaus joudutaan tekemään kiireessä kalliiseen kuparin markkinahintaan, jotta pystytään varmistamaan kaapelien toimitus ajoissa. Tästä syystä tuleva kaapelien tarve olisi tärkeää selvittää tarpeeksi ajoissa, jotta kaapeleiden ostajalla olisi riittävästi aikaa yrittää ajoittaa tilaus edulliseen hintatasoon.



Kuparin maailmanmarkkinahinnassa muutaman kuukauden aikana mahdollisesti tapahtuva 10–20 %:n hinnanmuutos tarkoittaa pienen laivan kaapelointikustannuksissa muutamaa kymmentätuhatta euroa. Vastaava kuparin hinnanmuutoksen vaikutus isossa risteilijässä voi olla useita satojatuhansia euroja. Kuvassa 4 esitetään kuparin maailmanmarkkinahinnan vaikutusta vertailtavana olevan 7 MW jäänmurtajan kaapelointikustannuksiin eli työ- ja materiaalikustannuksiin. Kuva ei sisällä kaikkia laivan kaapeleita, vaan ainoastaan niiden laitteiden syöttökaapelit joiden jännitteeseen on mahdollista vaikuttaa. Kuparin hinta esitetään kuvassa euroina kuparitonnia kohti:



Kuva 4. Kuparin maailmanmarkkinahinnan vaikutus kaapelointikustannuksiin

Kuvasta 4 ilmenee, että 50 % kuparin maailmanmarkkinahinnan nousu nostaa kaapelointikustannuksia jopa 25 %. Lisäksi yksi kaapelointikustannuksiin vaikuttava muuttuja on euron ja dollarin välinen valuuttakurssivaihtelu.

#### 4.3 Riittävä aikataulu hankinnalle

Kuparin maailmanmarkkinahinnan suuren merkityksen vuoksi riittävään hankinta-aikatauluun kannattaa kiinnittää huomiota, vaikka kuparin hintakehitystä voikin olla välillä vaikea ennakoida. Kokenut ostaja pystyy kuitenkin arvioimaan, milloin olisi otollinen

hetki sitoa tilaus sen hetkiseen maailmanmarkkinahintaan, kunhan tälle vain annetaan tilaisuus, eli aikaa. Taulukossa 7 arvioidaan hankinnan kokemusten perusteella sopivaa aikataulua kaapelitarpeen selvittämiseksi. Tieto kaapelitarpeesta ei voi tulla liian ajoissa.

Taulukko 7. Aikataulu kaapelitarpeen selvittämiseksi

Tieto kaapelitarpeesta	
nykyään	n. 2–3 kk etukäteen
riittävä	6 kk etukäteen
erittäin hyvä	9 kk etukäteen

## 5 Vertailun toteutus

Vertailussa haluttiin selvittää jännitteen valinnan vaikutuksia kaapelointiin liittyviin kustannuksiin, sekä vaikutusta laitteiden saatavuuteen ja hintaan. Lopputuloksen tarkentamiseksi kaapelointikustannukset haluttiin jakaa erikseen työ- ja materiaalikustannuksiin. Lopullisiin kaapelointikustannuksiin vaikuttava kuparin maailmanmarkkinahinta vaikuttaa kaapeleiden hintoihin, mutta ei työkustannuksiin. Vertailemalla työ- ja materiaalikustannuksia erikseen, kuparin hinnan vaikutus on paremmin nähtävissä.

Riittävän kattavan vertailun aikaansaamiseksi työssä täytyi selvittää jännitteen vaikutusta laitteiden saatavuuteen ja hintaan. Vasta molempien asioiden huomioimisen jälkeen on mahdollista arvioida jännitteen valinnan vaikutuksia lopullisiin kustannuksiin.

### 5.1 Kaapelinvetotyön kustannusten arvioiminen

Helsingin telakalla käytetään kaapelinvedossa apuna paljon alihankintaa. Järjestely toimii siten, että alihankintayritykselle annetaan vedettäväksi tiettyjen alueiden kaapelinvedot. Kaapelinvetotyö hinnoitellaan vedettyjen metrien mukaan ja metrihintaan vaikuttaa vedettävän kaapelin tyyppi. Tällainen hinnoittelumenetelmä mahdollistaa kaapelinvedon työkustannusten arvioinnin ja seurannan tarkasti.

Telakan omien asentajien suorittaessa kaapelinvetotyötä kustannusten arviointi on haasteellisempaa, koska kustannukset syntyvät asentajien käyttämien työtuntien mukaan. Tästä syystä omia asentajia käytettäessä kustannuksia ei voi arvioida ainoastaan vedettävien metrien ja kaapelityyppien mukaan. Kustannusten arvioinnin helpottamiseksi vertailua tehtäessä kaikki kaapelinvetotyö on oletettu ostettavaksi alihankintana.

Kaapelinvetotyöhön kuuluu myös osana kaapeleiden kiinnitys ja läpivientien pakkaaminen. Yksivaiheisten kaapeleiden vetäminen sisältää käytännössä aina myös kaapeleiden kiinnityksen, koska tällaiset kaapelit on tärkeää saada paikoilleen heti vetämisen jälkeen. Sen sijaan muiden kaapeleiden kohdalla kaapeleiden kiinnitys ja pakkaus erotellaan omaksi työksi. Pieniä kaapeleita ei usein ole mahdollista kiinnittää, ennen kuin kaikki kaapeliradalle tulevat kaapelit ovat paikoillaan. Tästä syystä kaapeleiden kiinnitys ja pakkaus hankitaan erillisenä alihankintana, mikäli telakan omien asentajien aika työn tekemiseen ei riitä. Työ voidaan hinnoitella kaapeliratojen leveyden ja kaapeleiden

lukumäärän mukaan, urakkahintana tai tuntityönä. Kaapeleiden kiinnitys- ja pakkaus-kustannuksia on vaikea arvioida tarkasti suunnitteluvaiheessa, eikä niitä otettu huomioon insinööriä tehtäessä. Kaapelimäärän alentuessa kiinnitykseen ja pakkaukseen menevä aika kuitenkin vähenee.

## 5.2 Kaapeloinnin kustannusvertailun toteutus

Kaapelointikustannusten vertailu toteutettiin käyttämällä pohjana laivan kuluttajaluetteloa. Kuluttajaluettelon voitiin olettaa sisältävän lähes kaikki laivaan tulevat sähkölaitteet, joille on suunniteltu oma syöttökaapeli. Luettelossa sähkölaitteet on valmiiksi lajiteltu syöttävän taulun mukaan ja siitä käy ilmi mm. laitteen teho, jännite, virta, katkaisija ja syöttökaapelin tyyppi. Laitteista osan kohdalla oli myös valmiiksi arvioitu syöttökaapelin pituus. Syöttökaapelin pituustiedon puuttuessa tarvittava kaapelipituus arvioitiin laivan pohjapiirustuksen avulla. Kuluttajaluetteloa laajennettiin lisäämällä vaihtoehtoinen jännite ja laskemalla laitteiden ottama virta uudella jännitteellä. Kun laitteiden nimellisvirta korkeammalla jännitteellä tiedettiin, vaihtoehtoiselle jännitteelle voitiin valita optimaalinen kaapeli.

Laivan kuluttajaluettelo ei ole alun perin tarkoitettu kustannusten arviointiin, vaan se on apuväline laivan sähköjärjestelmän suunnittelua varten. Kuluttajaluettelo soveltuu kuitenkin hyvin myös kaapelointikustannusten arviointiin, kun tiedetään telakan kaapeleista maksamat hinnat, kaapelien vetokustannukset sekä muut kustannukset joita aiheutuu mm. päätteiden tekemiseen menevästä ajasta ja niiden materiaalikustannuksista.

Työssä haluttiin selvittää hinnan muutoksia niiden laitteiden kaapelointiin, joiden kohdalla jännitemuutoksia oli mahdollista tehdä. Vertailussa kuluttajaluettelosta valittiin siis ainoastaan sellaiset keskukset joiden jännitteeseen oli mahdollista vaikuttaa. Vertailun ulkopuolelle rajautui näin ollen mm. järjestelmien sisäiset kaapelit, ohjauskaapelit, valaistusta ja merenkulkulaitteistoja syöttävät 230 V:n keskukset sekä keittiölaitteita syöttävä 400 V:n keskus. Työssä ei ole arvioitu laivan kokonaiskaapelikustannuksia.

Kaapelinvetokustannus laskettiin käyttämällä alihankintana ostetun kaapelivetotyön metrihintaa. Kaapelihinnoissa kuparin maailmanmarkkinahinnan vaihtelu huomioitiin toteuttamalla vertailu eri kuparin maailmanmarkkinahinnoilla. Voimanjakelussa kytkentä-aikaa ei huomioitu vertailussa, koska pääasiassa kaapeleiden lukumäärä ei

muuttunut jännitteen vaihdon myötä. Kaapeleiden keventyessä niiden kytkeminen helpottuu, mutta ajallinen säästö ei liene kovin suuri.

Voimalaitospuolella päätteen tekemiselle arvioitiin molemmilla jännitevaihtoehdoilla aika työnjohdon avustuksella. Päätteiden materiaalikustannukset saatiin selville niiden hankinnasta vastaavilta henkilöiltä. Pienjännitteellä päätteen materiaalikustannukset vastaavat alle metrin pätkää kaapelia, mutta yhden keskijännitepätteen materiaalikustannukset ovat noin 10-kertaiset verrattuna pienjännitepätteeeseen. Pienjännitepätteen tekemiseen arvioitiin kuluvan aikaa noin puoli tuntia, kun taas keskijännitepätteen tekeminen vie keskimäärin kolme tuntia. Kaapelointiin liittyviä muita kustannuksia kuten kaapeliratojen tekemistä, läpivientien pakkaamista ja kaapeleiden kiinnittämistä ei ole huomioitu vertailussa.

Kun kaikkien laitteiden syöttökaapeleille oli arvioitu kustannukset yksitellen, voitiin kustannuksia vertailla tauluittain. Voimalaitosta ja voimanjakelua tarkasteltiin vertailussa erikseen.

### 5.3 Laitteiden kustannusvertailun toteutus

Laitteiden kustannusvertailu alkoi arvioimalla, minkä laitteiden hankintahintoihin jännite-tason muutoksella voisi olla vaikutusta. Kun laitteet saatiin listattua, pyydettiin potentiaalisilta laitetoimittajilta hintaindikaatiota samanlaisesta laitteesta kahdella eri jännitetasolla. Hintaindikaatiota pyydettiin seuraavista laitteista:

- päägeneraattorit
- propulsiomoottorit
- propulsiomoottoreiden taajuusmuuttajat
- propulsiotaulu PS1
- pääjakelutaulu MS1
- hätätaulu ES1
- pääjakelumuntajat.

Kun kaapelointikustannusten muutoksen lisäksi tiedetään jännitteen valinnan vaikutus laitteiden hankintahintaan, voidaan arvioida, olisiko korkeampi jännite vaihtoehtona lopulta kannattavampi. On mahdotonta sanoa, millainen vaikutus jännitteen valinnalla on laitteiden hankintakustannuksiin muutaman vuoden kuluttua, koska hinnat todennäköisesti muuttuvat tulevaisuudessa. Valmistajilta saatavien tarjousten avulla voidaan kuitenkin arvioida, millaisia vaikutuksia jännitetason valinnalla on laitekustannuksiin.

## 6 Jännitetasojen vertailu

Jännitetasojen vertailu tehtiin vertailemalla eri jännitetasojen vaikutusta telakalla rakenteilla olevaan laivaan, jonka sähköverkon pääjakelukaavio esitetään kuvassa 5 (ks. s. 27). Valmisteilla oleva alus on potkuriteholtaan pieni, vain 7 MW. Laivan pituus on noin 70 metriä, joten sähköön siirtoetäisyydet eivät kasva suuriksi. Voimalaitoksen jännitteeksi on valittu hieman poikkeuksellinen 690 V, ja voimanjakelussa on päädytty tyypilliseen 400 V:n jännitteeseen. Vertailussa laivan voimanjakelu- ja voimalaitosverkot mitoitettiin uudestaan aiempaa korkeammilla jännitteillä.

Matala 690 V voimalaitoksen jännite nostaa laivassa suurten kuluttajien virrat korkeiksi. Korkeimmillaan yksittäiset kuluttajat ottavat laivassa normaalitilanteessa noin 3 000 A virran. Tällaisen virran siirtäminen vaatii valtavan kaapelien poikkipinta-alan, mikä nostaa kaapeloinnin kustannukset korkeaksi. Laivan voimalaitosverkko päätettiin mitoittaa tästä syystä uudestaan 3,3 kV:n jännitteellä. Jännitteen nostaminen 690 V:sta ylöspäin pienentäisi verkossa kulkevia virtoja samassa suhteessa. Kaapeleiden uudelleen mitoittamisella ja valitsemisella oli tarkoitus selvittää, millainen vaikutus virtojen laskulla olisi kaapelointikustannuksiin. Keskijännitekaapeleissa on pienjännitekaapeleita kaltevimmat eristeet, mutta pienemmän kuparin tarpeen ansiosta kaapeloinnin hinta tulisi putoamaan.

Keskijännitettä käytettäessä asennukseen ja käyttöönottoon liittyvät tekniset vaatimukset nousevat. Keskijännitteellä kaapeleihin joudutaan tekemään erityinen kaapelipääte, jossa kaapelin päätä kuoritaan ja suojataan, sekä kaapelin suojavaippa maadoitetaan. Yhden kaapelipäätteen tekeminen vie aikaa arviolta 3 tuntia, joten muutaman sadan suurjännitekaapelipäätteen tekemisestä muodostuu usean sadan tunnin urakka. Lisäksi keskijännitekaapelit tulee suojata ja eristää ympäristöstä pienjännitekaapeleita paremmin. Jos keskijännitekaapelin ympärillä ei ole riittävästi tilaa, joudutaan kaapelin ympärille rakentamaan kriittisiin paikkoihin metallinen suojatunneli, jota pitkin kaapelit kulkevat.

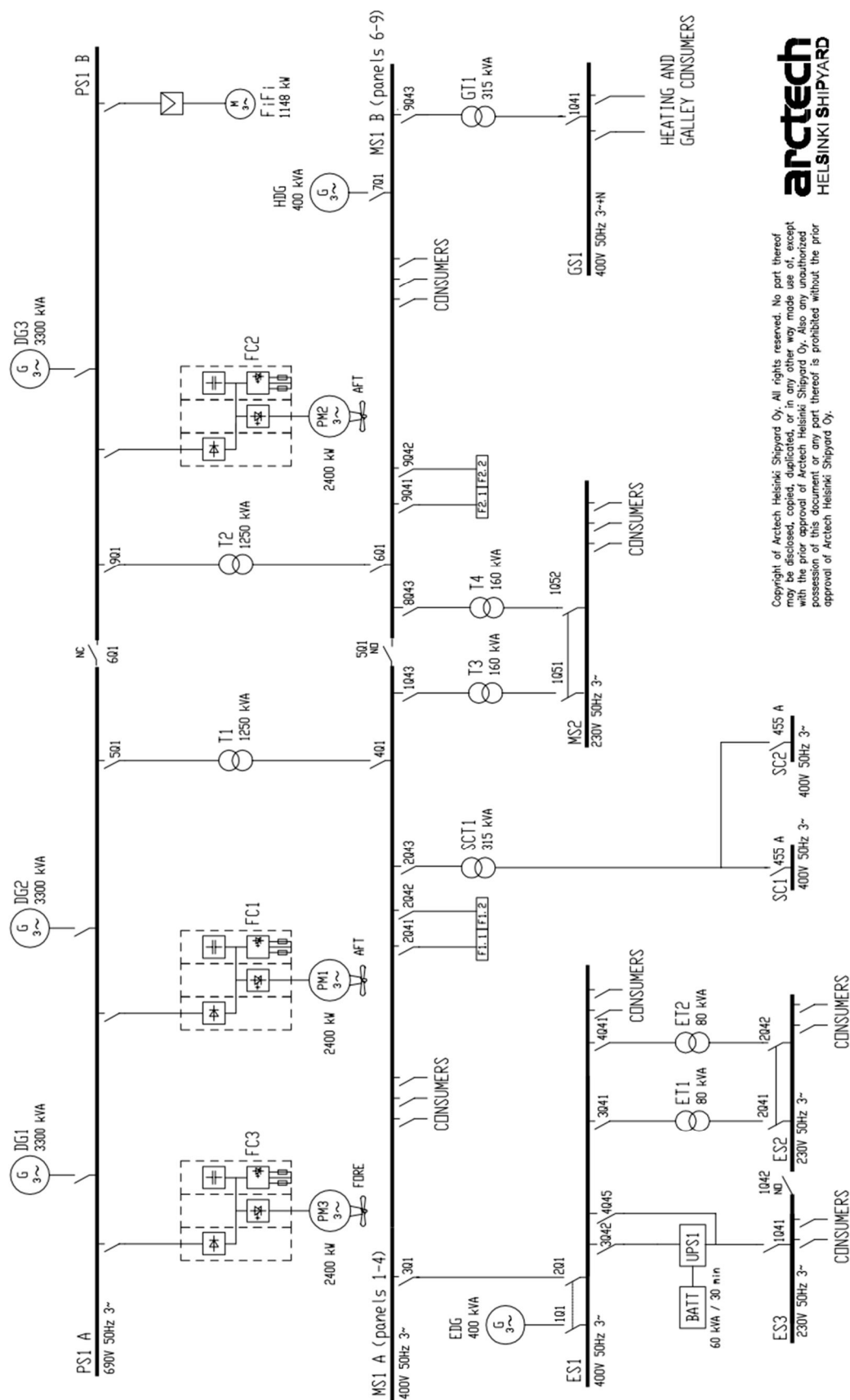
Ennen keskijännitekaapeleiden käyttöönottoa kaapeleille tulee tehdä jännitekoe. Kokeessa kaapeleihin kytketään testijännite, jolla varmistetaan eristeiden kunto. Kokeen aikana osassa laivan tiloja ei voi turvallisuussyistä työskennellä, joten koe joudutaan suorittamaan normaalien työaikojen ulkopuolella. Koe vaatii esivalmisteluja ja koestusta varten joudutaan kokoamaan testiryhmä.

Siirryttäessä pienjännitteestä keskijännitteeseen laitteiden ja komponenttien hinnat saattaisivat nousta merkittävästi. Tästä syystä haluttiin selvittää jännitteen valinnan vaikutusta laitteiden hintoihin. Mikäli laitteiden kustannukset nousevat huomattavasti ja syövät pienentyneiden kaapelointikustannusten hyödyn, jännitteen nostaminen ei olisi kannattavaa.

Laivan voimanjakeluverkko on suunniteltu hyväksi todetulla 400 V:n jännitteellä. Voimanjakeluverkko päätettiin mitoittaa uudestaan 690 V:n jännitteellä. Jännitetason nosto 400 V:sta 690 V:iin ei vaadi kaapelityypin muutosta. Katkaisijoiden kohdalla katkaisukyky kuitenkin laskee, huolimatta siitä, että oikosulkuvirrat pienentyvät. Korkeampaa jännitettä varten joudutaan siis valitsemaan suuremmat katkaisijat. Katkaisijoita joihin jännitteen nosto vaikuttaa saattaa olla satoja, joten tästä aiheutuva lisäkustannus tulee ottaa huomioon.

Pysyttäessä pienjännitteessä voimanjakelupuolen jännitteen valinnalla ei ole laitteiden hankinnan kannalta suurta käytännön merkitystä. Suuremman teollisuudessa yleisen 690 V jännitteen valitseminen saattaa kuitenkin aiheuttaa pienen epävarmuustekijän erikoisimpia laitteita hankittaessa. Sen sijaan teollisuuden lisäksi kotitalouksissa yleinen 400 V:n jännitetaso takaa varman laitteiden saatavuuden. Kun kaapelointikustannusten ero selviää, tulee tämän jälkeen pohtia, kumpaa jännitettä halutaan käyttää.





Kuva 5. Vertailtavan laivan NB508 sähköverkon pääjakelukaavio

## 6.1 Voimanjakeluverkon toteutus 690 V:n jännitteellä

Voimanjakeluverkon muuttaminen 690 V:n jännitetasoon vaatisi MS1- ja ES1-taulujen valitsemisen korkeamman jännitteen mukaan. Kasvavalla jännitteellä olisi merkittävä vaikutus tauluissa oleviin katkaisijoihin, jotka tulisi vaihtaa suurempiin, jotta riittävä oikosulkuvirran katkaisukyky säilyisi korkeammalla jännitteellä. Lisäksi hätä- (EDG) ja satamageneraattorin (HDG) tulisi tuottaa korkeampaa 690 V:n jännitettä.

Voimalaitoksen syöttömuuntajien (T1 ja T2) muuntosuhde tulisi valita siten, että voimanjakelussa saataisi 690 V:n jännitetaso. Muuntosuhde tulisi huomioida myös maistasyötön muuntajassa (SCT). Samoin valaistusmuuntajien (T3 ja T4) muuntosuhde tulisi valita siten, että valaistusverkon jännite olisi edelleen 230 V. Keittiölaitteiden muuntaja (GT) tulisi valita sen mukaan, että keittiölaitteiden jännitteenä säilyisi 400 V. Kasvaneella jännitteellä olisi myös vaikutusta harmonisia yliaaltoja poistavien suodattimien (F1.1–2.2) valintaan. Jännitetason nostolla ei sen sijaan olisi vaikutusta kaapelointiin eristeiden kannalta, eikä pääsääntöisesti moottoreiden valintaan. Jännitetaso tulee kuitenkin huomioida moottoria kytkettäessä.

## 6.2 Voimalaitoksen toteutus 3,3 kV:n jännitteellä

Toteutettaessa verkon voimalaitospuoli 3,3 kV:n jännitteellä jouduttaisiin valitsemaan nimellisjännitteeltään korkeampia komponentteja. Generaattoreiden (DG1–3) tulisi tuottaa sähkö 3,3 kV:n jännitteellä, potkurimoottoreiden (PM1–3) ja potkurimoottoreiden taajuusmuuttajien (FC1–3) tulisi soveltua 3,3 kV:n jännitteelle, sekä vesitykin (FiFi) ja tykin pehmokäynnistimen tulisi olla tarkoitettu 3,3 kV:n jännitteelle. Lisäksi verkkoon tulisi valita 3,3 kV kestävät keskijännitekaapelit sekä katkaisukyvyltään riittävät katkaisijat. Muuttunut muuntosuhde tulisi myös ottaa huomioon voimanjakeluverkkoa syöttävissä muuntajissa (T1 ja T2).

### 6.3 Oikosulkulaskelmat

Valittavalla jännitetasolla on ratkaiseva merkitys oikosulkuvirtojen kannalta. Oikosulkuvirran pysyvän tilan arvo asettaa jännitteen ohella vaatimukset katkaisijoiden ja sulakkeiden katkaisukyvyille. Oikosulkuvirran huippuarvo määrittelee vaatimukset kiskostojen mekaaniselle kestävyydelle. Oikosulkuvirtaa ja sen huippuarvoa voidaan arvioida karkeasti nimellisvirran avulla. Suurempi nimellisvirta aiheuttaa myös suuremmat oikosulkuvirrat. Näin ollen tehon pysyessä vakiona pienemmällä jännitteellä aiheutuu suuremmat oikosulkuvirrat. [1, s. 47.]

Tarkemman teknisen tiedon puuttuessa, oikosulkuvirtoja voidaan arvioida karkeasti seuraavien kaavojen avulla:

- $I_{k\text{ RMS}} = 10 * I_n$
- $I_{\text{peak}} = 2,5 * I_{k\text{ RMS}}$

Kaavat toimivat, kun voimalaitoksessa on yksi tai useampi samanlainen generaattori. Nimellisvirraksi asetetaan yksittäisen generaattorin nimellisvirta ja kaavat antavat vastaukseksi yksittäisen generaattorin oikosulkuvirran. Jos oikosulkuhetkellä kytkettyjä generaattoreita on useampi, saadut virta-arvot täytyy kertoa generaattoreiden lukumäärällä.

Tarkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen on aikaa vievää, ja niihin vaikuttaa mm. eri komponenttien impedanssit sekä oikosulkuhetkellä kytkettynä olevat kuormat. Käytännössä mm. kaapelien ja kiskostojen impedanssit laskevat oikosulkuvirran huippuarvoa, mutta pysyvän tilan oikosulkuvirta nousee hieman kuormana olevien sähkömoottorien ansioista. Käynnissä oleviin sähkömoottoreihin on sitoutunut liike-energiaa ja kun kiskostossa tapahtuu oikosulku, rupeaa pyörivä sähkömoottori syöttämään oikosulkuun lisää tehoa ja oikosulkuvirta kasvaa.

Työssä haluttiin tutkia jännitteen vaikutusta oikosulkuvirtoihin. Voimanjakelun kohdalla oikosulkuvirtojen laskenta toteutettiin käyttämällä ABBdoc-ohjelmaa. Arvot ovat tarkkoja, koska laivan jakeluverkko oli mallinnettu ohjelmaan tarkasti. Voimalaitoksen arvot laskettiin käsin, ja ne ovat suuntaa antavia. Voimalaitoksen oikosulkuvirtoja laskettaessa ei ole otettu huomioon kaapeleiden ja kiskostojen impedansseja eikä pyörivien moottoreiden vaikutusta oikosulkutilanteeseen. Tarvittavat generaattorin arvot

3 300 V:n oikosulkulaskelmaan saatiin telakan tekemästä aikaisemmasta laivaprojektista, jossa oli teholtaan vertailtavan laivan generaattoreita vastaava generaattori, mutta 3 300 V:n jännitteellä.

### 6.3.1 Voimanjakeluverkon oikosulkuvirrat

Vertailtavan laivan sähköverkko oli mallinnettu tarkasti ABBdoc-ohjelmaan, joten ohjelman avulla saatiin laskettua tarkasti pääjakelutaulussa tapahtuvan oikosulun aiheuttamat oikosulkuvirrat. Laivan pääjakelutaulu on jaettu A- ja B-osaan, joten myös oikosulkuvirtoja vertaillaan taulukossa 8 taulun puolisko kerrallaan.

Taulukko 8. MS1-tilun oikosulkuvirrat

		<b>400 V</b>	<b>690 V</b>
<b>MS1 A</b>	<b>Ik</b>	23,4 kA	13,7 kA
	<b>Ip</b>	45,0 kA	26,5 kA
<b>MS1 B</b>	<b>Ik</b>	23,1 kA	13,6 kA
	<b>Ip</b>	43,9 kA	25,9 kA

Taulukosta 8 ilmenee, että oikosulkuvirrat putoavat samassa suhteessa kuin jännitettä nostetaan. Pienemmät oikosulkuvirrat rasittavat kiskostoja ja komponentteja vähemmän, mutta suuremmalla jännitteellä tarvitaan kuitenkin järeämmät katkaisijat, jotta riittävä oikosulkuvirran katkaisukyky säilyy.

### 6.3.2 Voimalaitoksen oikosulkuvirrat

Voimalaitoksen oikosulkuvirrat laskettiin käsin. Laskettaessa vikavirtoja 690 V:n jännitteellä käytettiin laskuissa laivaan tulevien generaattoreiden arvoja. Laskettaessa mahdollisia oikosulkuvirtoja 3 300 V:n jännitteellä käytettiin telakan aiempaan laivaan asentamien generaattoreiden arvoja. Kyseinen generaattorimalli sopisi tehon puolesta hyvin myös vertailtavaan laivaan. Laskettaessa oikosulkuvirtoja pienjännitteellä, käytettiin taulukon 9 (ks. seur. s.) mukaisia generaattorin arvoja.

Taulukko 9. 690 V:n generaattorin arvot

Nimellisteho [S]	3 300 kVA
Nimellisjännite [U]	690 V
Nimellisvirta [I]	2 761 A
Tehokerroin [cos φ]	0,90
Taajuus [f]	50 Hz
Pitkittäinen alkureaktanssi [X''d]	16,4 %
Staattorikäänin resistanssi [Ra]	0,0010 Ω

Oikosulkuvirrat laskettiin seuraavien kaavojen mukaan:

- oikosulkuvirta  $I_{kRMS}$

$$IkRMS = \frac{In}{X''d} = 16,84 \text{ kA}$$

- sysäyskertoimen määrittämiseen tarvittava staattorireaktanssi  $Xa$  saadaan kaavalla

$$Xa = X''d * \frac{Un^2}{Sn} = 0,024 \Omega$$

- virran huippuarvon laskemiseen tarvitaan sysäyskerroin, joka saadaan kun tiedetään resistanssin ja reaktanssin suhde R/X

$$R/X = \frac{Ra}{Xa} = 0,042$$

- sysäyskerroin K (= 1,9) katsotaan kuvaajasta (liite) R/X -kertoimen perusteella
- virran huippuarvo  $I_p$  lasketaan kaavalla

$$Ip = IkRMS * K * \sqrt{2} = 45,25 \text{ kA}.$$

Toteutettaessa voimalaitos keskijännitteellä, oikosulkuvirrat pienenisivät. Laskettaessa oikosulkuvirtoja keskijännitteellä, käytettiin taulukon 10 mukaisia generaattorin arvoja.

Taulukko 10. 3 300 V:n generaattorin arvot

Nimellisteho [S]	3 072 kVA
Nimellisjännite [U]	3 300 V
Nimellisvirta [I]	538 A
Tehokerroin [cos φ]	0,90
Taajuus [f]	50 Hz
Pitkittäinen alkureaktanssi [X''d]	19,8 %
Staattorikäänin resistanssi [Ra]	0,0258 Ω

Oikosulkuvirrat laskettiin seuraavien kaavojen mukaan:

- oikosulkuvirta  $I_{k\text{ RMS}}$

$$Ik_{RMS} = \frac{In}{X''d} = 2,717 \text{ kA}$$

- sysäyskertoimen määrittämiseen tarvittava staattorireaktanssi  $X_a$  saadaan kaavalla

$$X_a = X''d * \frac{Un^2}{Sn} = 0,702 \Omega$$

- virran huippuarvon laskemiseen tarvitaan sysäyskerroin, joka saadaan kun tiedetään resistanssin ja reaktanssin suhde  $R/X$

$$R/X = \frac{Ra}{Xa} = 0,037$$

- sysäyskerroin  $K$  ( $= 1,9$ ) katsotaan kuvaajasta (liite)  $R/X$  -kertoimen perusteella
- virran huippuarvo  $I_p$  lasketaan kaavalla

$$I_p = Ik_{RMS} * K * \sqrt{2} = 7,301 \text{ kA}.$$

Käsin laskemalla voimalaitoksen oikosulkuvirroiksi eri jännitteillä saatiin taulukon 11 mukaiset arvot.

Taulukko 11. PS1-työkalun oikosulkuvirrat

PS1	690 V	3 300 V
$I_k$	16,84 kA	2,717 kA
$I_p$	45,25 kA	7,301 kA

Taulukosta 11 selviää, että vaihtamalla 690 V:n jännite 3 300 V:n jännitteeksi oikosulkuvirran pysyvän tilan arvo sekä huippuarvo putoaisivat molemmat noin 84 %.

#### 6.4 Jännitetason vaikutus laitteiden tilantarpeeseen

Jännitetaso on oleellinen tekijä määriteltäessä, kuinka paljon tilaa sähkölaite vaatii ympärillensä. Korkeammalla jännitteellä ilmavälien ja eristeiden paksuuksien tulee olla suurempia. Toisaalta tehon pysyessä samana virta laskee, joten kaapeleiden ja kiskojen poikkipinta-alaa voidaan pienentää. Tästä syystä kaapelit voivat eristeistä riippuen

pienentyä. Sähkölaitteiden kohdalla ulkomitat sen sijaan saattavat kasvaa jännitetason noston mukana.

Vertailtavan laivan sähkölaitteista suurien 1 250 kVA jakelumuuntajien kohdalla ensiöjännitteen muuttuminen 690 V:sta 3 300 V:iin ei aiheuta merkittävää laitteen ulkomittojen kasvua. Ensiöjännitteeltään 690 V:n muuntaja olisi leveydeltä 1,94 m, syvyydeltä 1,16 m ja korkeudelta 1,94 m. Siirryttäessä 3 300 V:n ensiöjännitteeseen muuntajan leveys kasvaisi 0,21 m, syvyys 0,215 m ja korkeus 0,03 m. Muutos ei ole merkittävä, eikä se aseta rajoitteita jännitteen valinnan kannalta.

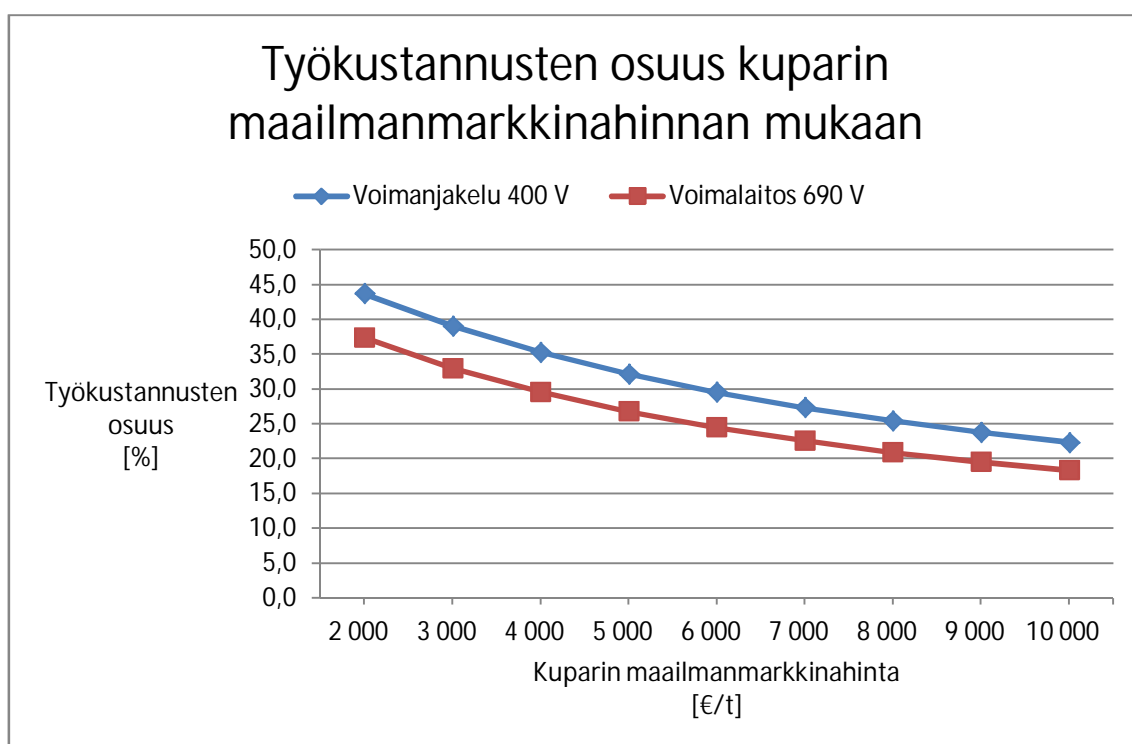
Laivan voimanjakelun jakelutaulujen ulkomittojen kannalta jännitteen muutoksella sen sijaan on oleellinen merkitys. Toteutettaessa MS1-tili 400 V:n jännitteellä tilin pituus olisi 6,64 m, syvyys 0,854 m ja korkeus 2,34 m. Jos jännitetasoksi valittaisiin 690 V, kasvaisi tilin pituus 2,4 metriä, muiden mittojen pysyessä käytännössä samana. Laivan ES1-hätätili olisi 400 V:lla pituudelta 2,84 m, syvyydeltä 0,654 m ja korkeudelta 2,128 m. Jos hätätili toteutettaisiin 690 V:n jännitteellä, kasvaisi tilin pituus 0,8 metriä, muiden mittojen pysyessä samana. Jakelutaulujen kohdalla jännitetason valinnalla on siis merkitystä tilien pituuteen, joka molempien tilien kohdalla kasvaisi noin kolmanneksella. On selvää, että näin suuri pituuden ja sen myötä tilantarpeen kasvu vaikeuttaa laitteiden sijoitusta. Ongelma korostuu pienessä laivassa ja siihen täytyy kiinnittää huomiota jo suunnittelun alkuvaiheessa.

Voimalaitoksen kohdalla laitetuottajalta saatiin hintaindikaatio hyvin karsitun erittelyn kanssa, joten laitteiden tilantarvetta arvioitiin käyttämällä hyväksi aiempien laivaprojektien materiaalia. PS1-tilissä tehon pysyessä samana jännitteellä ei huomattu olevan merkittävää vaikutusta kenttien kokoon, joten riippumatta siitä käytetäänkö 690 V:n vai 3 300 V:n jännitettä, tilin ulkomitat olisivat todennäköisesti samaa luokkaa. Tehon pysyessä samana myöskään generaattoreiden kohdalla jännitetasolla ei havaittu olevan vertailulaivan teholuokassa suurta vaikutusta laitteiden ulkomittoihin. Keski-jännitegeneraattori on todennäköisesti hieman pienjännitevaihtoehtoa suurempi kokoisempi, mutta ulkomittoihin vaikuttaa myös valittavan generaattorin malli.

## 6.5 Kaapeloinnin työkustannukset

Kaapeloinnin työkustannukset riippuvat vedettävien kaapelien lukumäärästä, pituudesta sekä tyypistä. Voimalaitoksen kohdalla työkustannuksissa tulee huomioida myös kaapeleiden päätteiden tekemiseen menevä työaika, joka vie erityisesti keskijännitteellä paljon aikaa.

Kaapeloinnin työkustannusten osuus kaapeloinnin kokonaiskustannuksista riippuu kuparin maailmanmarkkinahinnasta. Kaapeleiden hinta ei vaikuta työkustannuksiin, mutta kaapeleiden kallistuessa kokonaiskustannukset nousevat ja työkustannusten osuus sitä myötä laskee. Kuvassa 6 esitetään vertailulaivan työkustannusten osuus kaapeloinnin kokonaiskustannuksista kuparin maailmanmarkkinahinnan mukaan. Kuparin hinta esitetään kuvassa euroina kuparitonnia kohti:



Kuva 6. Työkustannusten osuus kaapeloinnin kokonaiskustannuksista kuparin maailmanmarkkinahinnan mukaan

Kuvasta 6 selviää, että työkustannusten osuus on edullisellakin kuparin maailmanmarkkinahinnalla alle puolet kaapelointikustannuksista. Pienien jakelukeskuksien kohdalla kuitenkin erityisesti matalalla kuparin hinnalla työkustannukset ovat usein korkeammat kuin kaapeleiden materiaalikustannukset. Kuvassa 6 on otettu huomioon



kaapeleiden vetokustannukset ja päätteiden tekemiseen menevä aika voimalaitoksen kaapeloinnissa. Kuvassa ei ole sen sijaan otettu huomioon muita kaapelointiin liittyviä työkustannuksia, kuten kaapeliratojen asennusta, kaapeleiden kiinnitystä ja pakkaamista eikä suunnittelusta aiheutuvia kustannuksia. Työkustannukset myös nousevat, jos aikataulullisista syistä joudutaan turvautumaan ylitöihin.

#### 6.5.1 Voimanjakelun työkustannukset

Voimanjakelun kohdalla itse kaapeloinnin työkustannukset muodostuvat ainoastaan kaapelien vetämisestä aiheutuvista työkustannuksista. Käyttämällä korkeampaa jännitettä kaapelit kevenevät, joten on selvää että työkustannukset pienenevät. Vertailulaivan kohdalla 690 V jännitetason käyttäminen olisi laskenut työkustannuksia noin 28 %. Hyöty kohdistuu isoihin päätaulujen kaapeleihin, jotka pienenevät merkittävästi. Sen sijaan pienien jakelutaulujen kaapeleiden kohdalla jännitetason nosto ei juuri vaikuta työkustannusten määrään.

#### 6.5.2 Voimalaitoksen työkustannukset

Voimalaitoksen kaapeloinnissa työkustannuksia aiheuttaa kaapelien vedon lisäksi myös kaapelipäätteiden tekeminen. Keskijännitteellä tarvittava kuparin määrä pienenee, ja sitä myötä kaapelit kevenevät sekä vähenevät, tämä pienentää vetokustannuksia pienjännitteeseen nähden merkittävästi. Keskijännitteellä kaapelipäätteiden tekeminen on kuitenkin aikaa vievää ja päätteiden kustannukset ovat selvästi suuremmat kuin pienjännitteellä. Keskijännitteellä kaapelien määrä ja sen myötä päätteiden määrä olisi tosin pienempi kuin pienjännitteellä.

Vertailulaivan kohdalla kaapelien vetokustannukset olisivat olleet 3 300 V:n jännitteellä noin 78 % pienemmät kuin 690 V:n jännitteellä. Sen sijaan kaapelipäätteiden työkustannukset ovat keskijännitteellä noin 36 % suuremmat kuin pienjännitteellä. Kokonaisuudessaan keskijännitevaihtoehdossa työkustannukset olisivat kuitenkin olleet noin 33 % pienemmät kuin käytettäessä pienjännitettä.

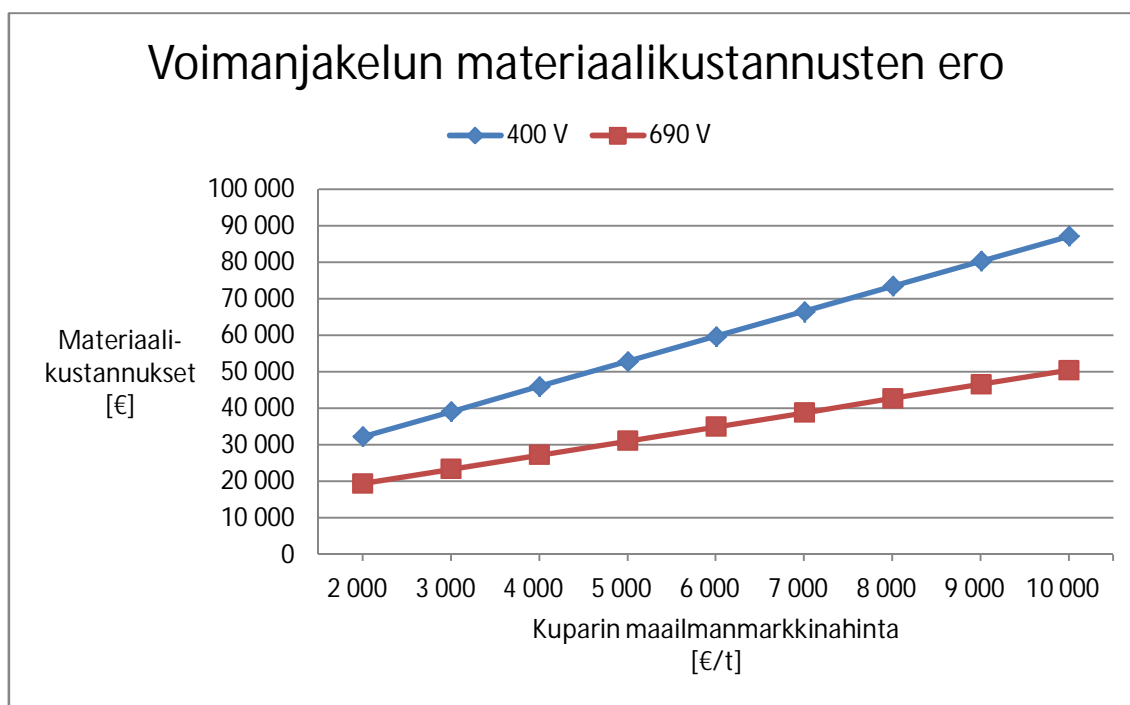
## 6.6 Kaapeloinnin materiaalikustannukset

Kaapeloinnin materiaalikustannukset käsittävät voimanjakelussa kaapeleiden kustannukset ja voimalaitoksessa kaapeleiden sekä kaapelipäätteiden kustannukset. Voimanjakelussa kaapelit pienenevät joten on selvää, että jännitetaso nosto vähentää materiaalikustannuksia. Voimalaitoksen kohdalla kuparin tarve pienenee merkittävästi, mutta tarvittavat kaapelit ovat eristeiltään vastaavia pienjännitekaapeleita kalliimpia. Lisäksi yhden keskijännitekaapelipäätteen materiaalikustannukset ovat moninkertaiset pienjännitepäätteeseen verrattuna.

Keskijännitevaihtoehto on sitä kannattavampi mitä suurempia kaapelipituudet ja siirrettävät tehot ovat. Tällöin säästetään mahdollisimman paljon kuparia ja kalliita kaapelipäätteitä tulee kaapelimetreihin nähden mahdollisimman vähän.

### 6.6.1 Voimanjakelun materiaalikustannukset

Voimanjakelun kaapeloinnin materiaalikustannuksia voidaan pienentää valitsemalla korkeampi jännitetaso. Säästön suuruus riippuu kuparin maailmanmarkkinahinnasta. Säästö on rahassa sitä suurempi, mitä korkeampi kuparin hinta on. Kuvassa 7 (ks. seur. s.) esitetään voimanjakelun kaapeleiden materiaalikustannuksia kahdella eri jännitteellä. Hintaero on kuvaajien erotus. Kuparin hinta esitetään kuvassa 7 euroina kuparitonnia kohti.

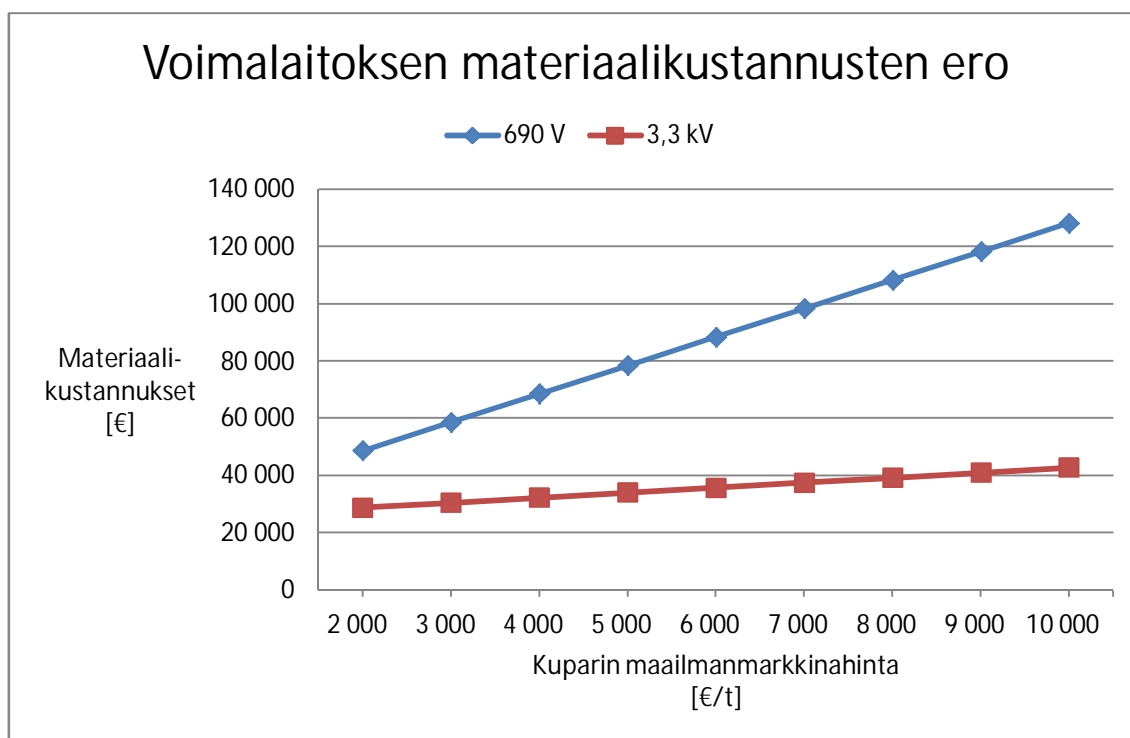


Kuva 7. Vertailuverkon voimanjakelun materiaalikustannukset kahdella eri jännitetasolla

Kuvasta 7 voidaan nähdä, että vertailtavien jännitetasojen välillä on selvä ero. Lisäksi valittaessa 400 V:n jännitetaso materiaalikustannukset muuttuvat hieman enemmän kuparin maailmanmarkkinahinnan mukana. Pienemmällä jännitteellä joudutaan käyttämään paksumpia kaapeleita, jolloin eristeiden osuus kaapelin hinnasta pienenee. Mitä enemmän kuparia kaapeleissa on eristeisiin nähden, sitä enemmän kaapelien hinta on riippuvainen kuparin hinnasta. Voimanjakelun kohdalla jännitetason nostaminen laski kaapelien kustannuksia lähes samassa suhteessa kuin jännitettä muutettiin.

#### 6.6.2 Voimalaitoksen materiaalikustannukset

Voimalaitoksen kaapeloinnin materiaalikustannukset ovat kahden tekijän summa. Niihin vaikuttavat sekä kaapeleiden hinnat että kaapelipäätteiden materiaalikustannukset. Kaapelipäätteiden kustannukset eivät ole suoraan riippuvaisia kuparin maailmanmarkkinahinnasta, joten pätekustannusten merkitys vähenee sitä mukaa, kun kuparin hinta nousee. Kuva 8 (ks. seur. s.) esittää voimalaitoksen materiaalikustannuksia 690 V:n ja 3 300 V:n jännitevaihtoehdoilla. Kuva sisältää kaapeleiden materiaalikustannukset, sekä kaapelipäätteiden materiaalikustannukset. Hintaero on kuvaajien erotus. Kuparin hinta esitetään kuvassa 8 euroina kuparitonniä kohti.



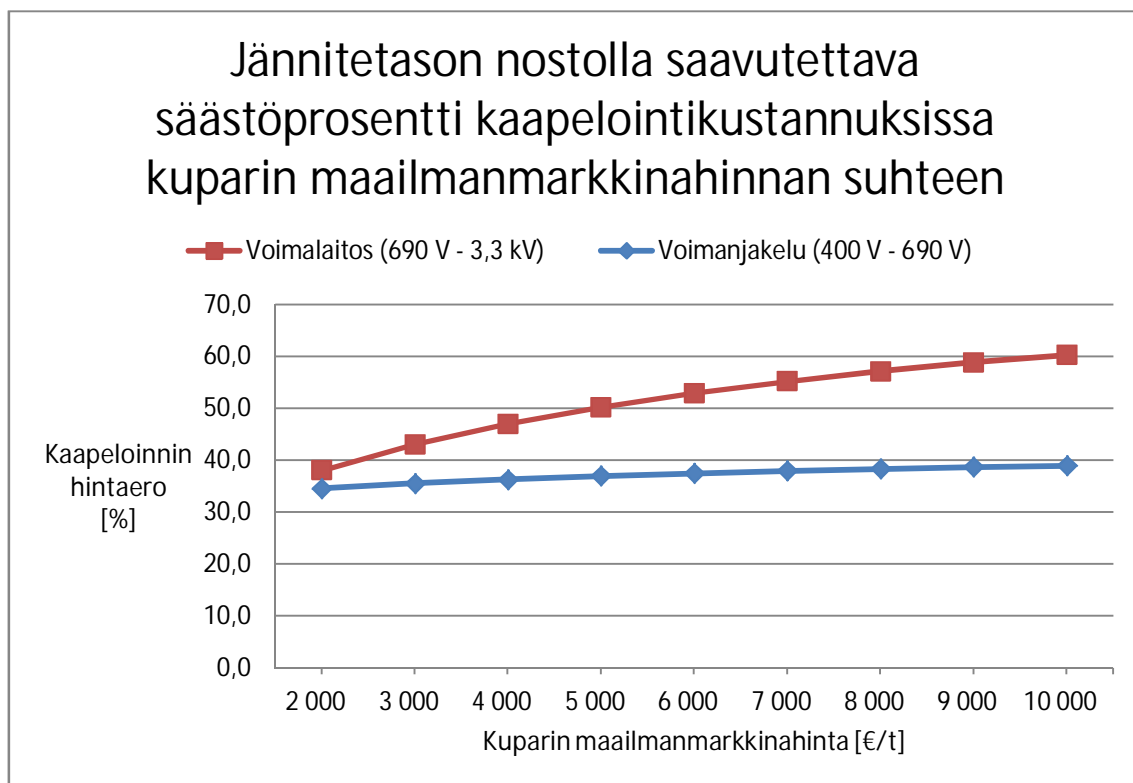
Kuva 8. Vertailuverkon voimalaitoksen materiaalikustannukset kahdella eri jännitetasolla

Kuvasta 8 selviää, että voimalaitoksen kaapeloinnin materiaalikustannukset ovat halvemmat keskijännitteellä myös edullisella kuparin maailmanmarkkinahinnalla. Ero kuitenkin korostuu kuparin hinnan ollessa korkea. Huomionarvoista myös on, että kuparin hinta vaikuttaa keskijännitteellä materiaalikustannuksiin vain hyvin vähäisesti. Eristeiden osuus keskijännitekaapelin hinnasta on suurempi kuin pienjännitekaapelissa, joten kuparin hinnan muutos ei vaikuta kaapeleiden hintoihin yhtä voimakkaasti. Lisäksi kaapelipäätteet aiheuttavat kiinteitä kustannuksia, joka vähentää kaapeleissa olevan kuparin osuutta lopullisesta hinnasta selvästi. Kuparin maailmanmarkkinahinnan muutokset aiheuttavat telakalle ylimääräisen epävarmuustekijän. Hinnan vaihtelun vaikutusta voidaan kuitenkin pienentää valitsemalla korkeampi jännitetaso.

## 6.7 Kaapeloinnin kokonaiskustannukset

Laskemalla vertailulaivan voimanjakelun ja voimalaitoksen kaapelointikustannukset voidaan todeta kustannusten laskevan käyttämällä korkeampaa jännitetasoa. Saavutettava rahallinen säästö riippuu oleellisesti kuparin maailmanmarkkinahinnasta. Säästö on isompi silloin, kun kuparin hinta on korkea. Kuvassa 9 (ks. seur. s.) esitetään jännitetasoa nostamalla vertailulaivan kaapeloinnissa saavutettava säästöprosentti kuparin

maailmanmarkkinahinnan mukaan. Säästöprosentti koskee ainoastaan sitä osaa kaapeloinnista, jonka kohdalla jännitetasoa on mahdollista nostaa. Kuva 9 sisältää kaapeleiden materiaalikustannukset, kaapeleiden vetotyöstä aiheutuvat työkustannukset sekä voimalaitoksen kohdalla päätteiden tekemisestä aiheutuvat työ- ja materiaalikustannukset. Kuparin hinta esitetään kuvassa euroina kuparitonnia kohti:



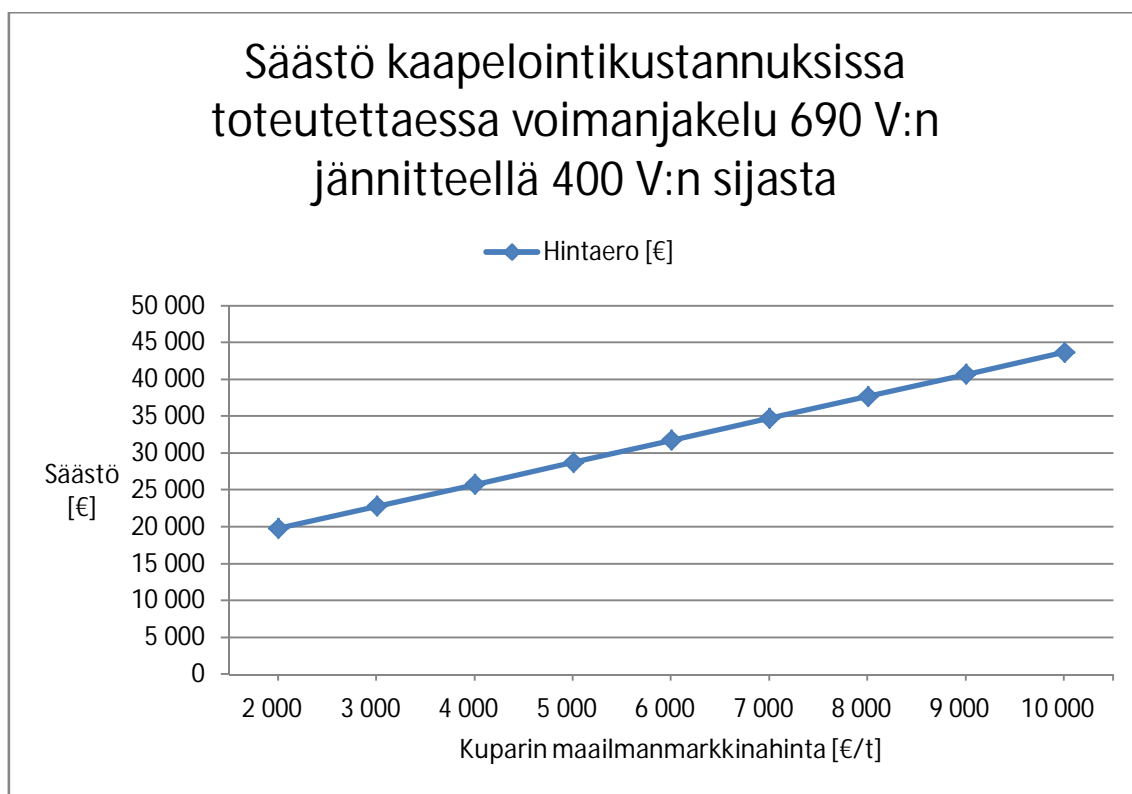
Kuva 9. Kaapelointikustannuksissa saavutettava säästöprosentti siirryttäessä ylempään jännitetasoon

Kuvasta 9 selviää, että voimanjakelun kaapelointi on kuparin maailmanmarkkinahinnasta riippumatta hieman yli kolmanneksen halvempi toteuttaa 400 V:n sijasta 690 V:n jännitteellä. Voimalaitoksen kohdalla saavutettava säästöprosentti riippuu merkittävästi kuparin hinnasta. Keskijännitteellä materiaalikustannukset ovat selvästi vähemmän riippuvaisia kuparin hinnasta kuin pienjännitteellä, joten ero kustannuksissa jännite-  
tasojen välillä korostuu korkealla kuparin hinnalla.

#### 6.7.1 Voimanjakelun kaapelointikustannukset

Vertailulaivan voimanjakelun kaapelointikustannusten ero esitetään kuparin maailmanmarkkinahinnan mukaan kuvassa 10 (ks. seur. s.). Kuva sisältää työkustannusten

ja materiaalikustannusten hintaeron. Kuparin hinta on kuvassa euroina kuparitonnia kohti:

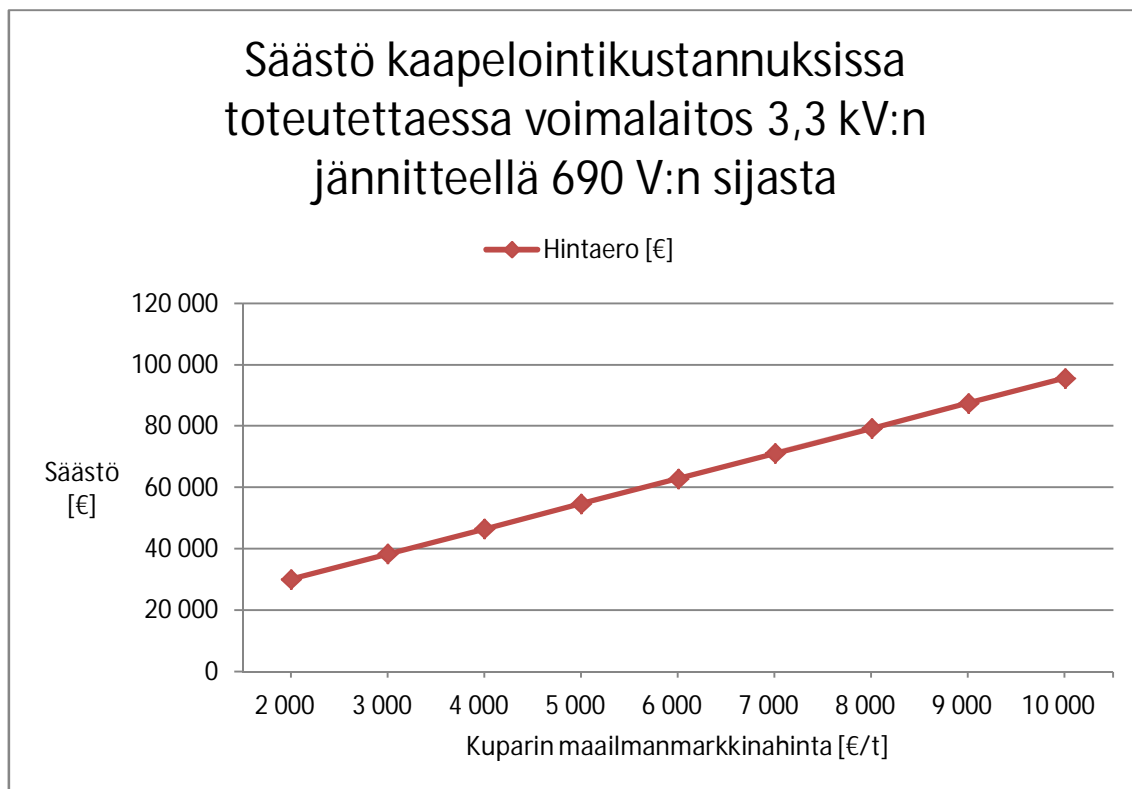


Kuva 10. Ylempään jännitetasoon siirtymällä saavutettava säästö vertailulaivan voimanjakelun kaapelointikustannuksissa

Voimanjakelussa jännitetason nostaminen pienentää sekä työ- että materiaalikustannuksia. Jännitetason nostolla saavutettava säästö riippuu kuparin maailmanmarkkinahinnasta. Jännitetasoa valittaessa tulee huomioida, nousevatko laitekustannukset enemmän, kuin mikä on kaapeloinnissa saavutettava säästö odotettavissa olevalla kuparin hinnalla. Jos kaapeloinnissa saavutettava säästö ylittää kasvavat laitekustannukset, korkeamman jännitetaso valinta on perusteltua.

#### 6.7.2 Voimalaitoksen kaapelointikustannukset

Vertailulaivan voimalaitoksen kaapelointikustannusten ero esitetään kuparin maailmanmarkkinahinnan mukaan kuvassa 11 (ks. seur. s.). Kuvassa on huomioitu kaapeleiden materiaalikustannukset, vetotyön kustannukset sekä kaapelipäätteistä aiheutuvat kustannukset. Kuparin hinta esitetään kuvassa euroina kuparitonnia kohti.



Kuva 11. Ylempään jännitetasoon siirtymällä saavutettava säästö vertailulaivan voimalaitoksen kaapelointikustannuksissa

Keskijännitteellä kaapelipäätteet ovat selvästi pienjännitepäätteitä kalliimpia, mutta alentuneiden kaapelikustannusten sekä vetokustannusten ansioista kaapelointi tulee keskijännitteellä selvästi pienjännitettä edullisemmaksi. Korkeampaan jännitetasoon siirtymällä saavutettava säästö riippuu kuitenkin voimakkaasti kuparin maailmanmarkkinahinnasta. Matalalla kuparin hinnalla laitteiden kustannukset eivät voi nousta paljoa pienjännitteeseen verrattuna, muutoin kaapelointikustannuksissa saavutettava säästö menetetään.

## 6.8 Jännitetason vaikutus laitekustannuksiin

Tarjouksia pyydetessä huomattiin jännitetason olevan merkittävä tekijä hinnan määrityksen kannalta, erityisesti voimalaitoksen osalta. Jännitetasolla ei välttämättä ole tietyissä tapauksissa juuri merkitystä hinnan kannalta, toisissa tapauksissa merkitys saattaa kuitenkin olla erityisen suuri. Jos laitetoimittajalla ei ole tarjota tietyllä jännitteellä oikeanlaista laitetta, saatetaan tarkoitukseen tarjota huonosti sopivaa, kuten ylimitoitettua vaihtoehtoa. Tämänlainen tapaus nostaa laitekustannuksia turhaan. Telakan

kannalta ei ole välttämättä mahdollista tietää etukäteen millaisia vartenotettavia vaihtoehtoja laitetoimittaja pystyy tarjoamaan, joten tarjouksia kannattaa pyytää erilaisista kokonaisuuksista.

#### 6.8.1 Voimanjakelun laitekustannukset

Voimanjakelun jännitetason nostolla on vaikutusta pääjakelutaulun MS1 ja hätäjakelutaulun ES1 hintoihin. Molempien taulujen kohdalla siirryttäessä 400 V:n jännitteestä 690 V:iin taulujen hankintahinta nousee noin 15 %. Euromääräinen muutos on kyseisten taulujen kohdalla yhteensä hieman alle 40 000 euroa.

#### 6.8.2 Voimalaitoksen laitekustannukset

Voimalaitoksen kohdalla laitetoimittajalta ei saatu keski-jännitteellä kilpailukykyistä tarjousta pienjännitevaihtoehdolle, koska laitetoimittajalta ei löytynyt kysytyyn erittelyyn hyvin sopivaa generaattorimallia eikä riittävän pienitehoisia taajuusmuuttajia. Keski-jännitevaihtoehdolle olisi tullut noin 500 000 euroa pienjännitevaihtoehtoa enemmän hintaa. Suhteessa hinnan nousu on kuitenkin vain reilu 15 %. Tilanne todennäköisesti muuttuisi, jos kyseessä olisi ollut todellinen laivaprojekti, johon laitetoimittaja olisi halunnut osallistua mahdollisimman kilpailukykyisellä tarjouksella. Tässä tapauksessa laitetoimittaja olisi yrittänyt löytää käyttötarkoitukseen paremmin sopivat generaattorit ja taajuusmuuttajat, jolloin hintaero pienjännite ja keski-jännitevaihtoehtojen kohdalla todennäköisesti pienenisi reilusti. Yleisesti voimalaitoksen laitteiden hintojen vertailu on hyvin vaikeaa, koska telakka tyypillisesti ostaa tarvittavat laitteet isona kokonaisuutena. Käytännöllä on kuitenkin etuna järjestelmien rajapintojen väheneminen ja telakan vastuun pienentyminen.

Laivan 1 250 kVA jakelumuuntajien hinnan kannalta ei ole käytännössä merkitystä tila- taanko muuntajat 690/400 vai 3300/400 -muuntosuhteella. Kahden eri vaihtoehtoon hintaero oli vertailussa selvästi alle 5 %. Euromääräinen ero vaihtoehtojen välillä ei ole merkittävä.



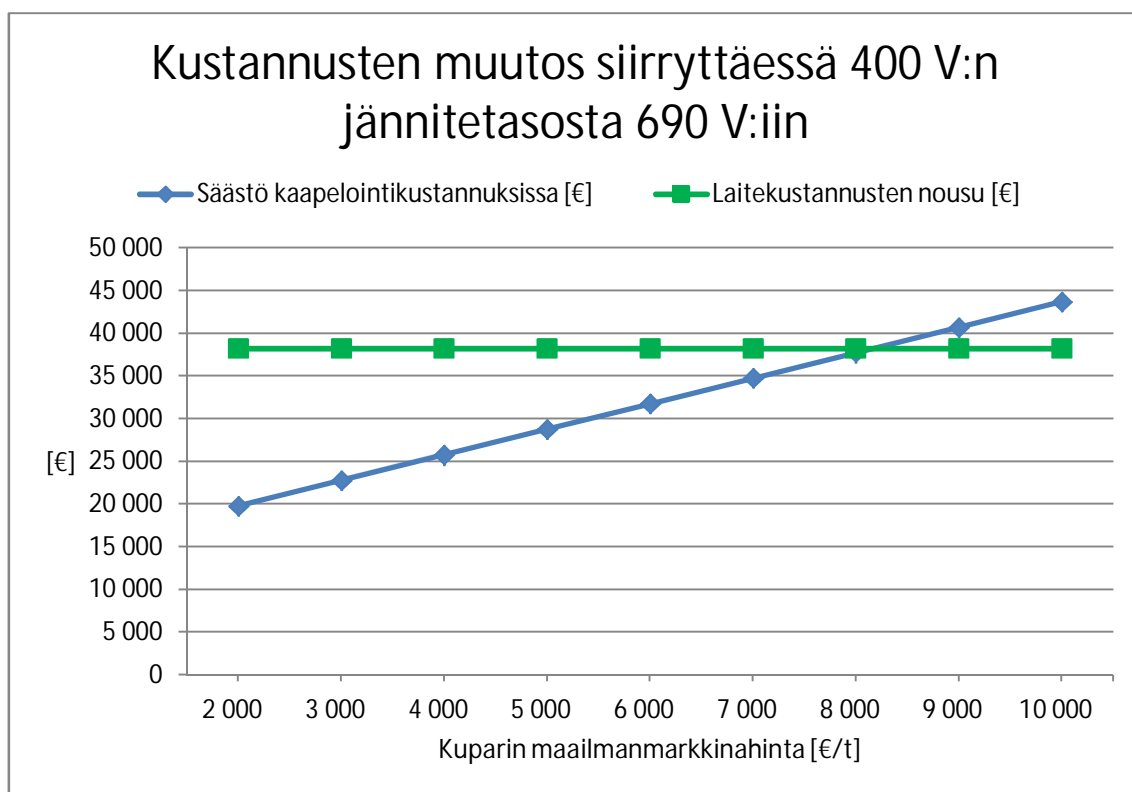
## 6.9 Jännitetaso vaikutus kokonaiskustannuksiin

Lopullisiin eri vaihtoehtojen kustannuksiin vaikuttavat kaapelointikustannukset, laitekustannukset sekä mahdollisesti tarvittavat ylimääräiset laitteet tai laitteet, jotka voitaisiin jättää pois. Vertailussa jännitetaso korotus nosti yleisesti laitteiden hintoja, tosin kaikkien laitteiden kohdalla hinta ei noussut merkittävästi. Jännitetaso nosto taas laski kaapelointikustannuksia, myös siirryttäessä kevyemmin eristetyistä pienjännitekaapeleista kalliimmin eristettyihin keskijännitekaapeleihin.

Vertailussa huomattiin, että kallistuvat laitekustannukset kumoavat helposti tämän ko-koisessa laivassa halventuneesta kaapeloinnista saatavan hyödyn. Ratkaisevaksi tekijäksi todennäköisesti muodostuu se, voidaanko jollain jännitteellä jättää laitteita pois. Erityisesti voimalaitoksen kohdalla ratkaiseva tekijä on myös eri kokoluokan laitteiden tarjonta. Halvin hinta saavutetaan todennäköisesti valitsemalla mitoitukseltaan sopi-vimmat laitteet.

### 6.9.1 Jännitetaso vaikutus voimanjakelun kokonaiskustannuksiin

Voimanjakelun kohdalla nykyisellä noin 5 500 €/t kuparin maailmanmarkkinahinnalla MS1- ja ES1-taulujen kustannukset nousevat enemmän kuin kaapelointikustannukset laskevat. Jos sähköjakeluverkko pidetään muuten ennallaan, ei jännitetaso nosto ole tämänhetkisellä kuparin hinnalla kannattavaa. Jännitetaso noston kannattavuutta esi-tetään kuvassa 12 (ks. seur. s.). Kuparin hinta on kuvassa euroina kuparitonnia kohti.



Kuva 12. Jännitetason noston kannattavuus kuparin maailmanmarkkinahinnan suhteen

Kuvasta 12 ilmenee, että kuparin maailmanmarkkinahinnan ollessa noin 8 000 €/t halventuvat kaapelointikustannukset riittävät kattamaan MS1- ja ES1-taulujen kasvaneen hankintahinnan. Kuparin markkinahinta on vaihdellut viime vuosina voimakkaasti, joten hinnan merkittävä nousu on mahdollista.

#### 6.9.2 Jännitetaso vaikutus voimalaitoksen kokonaiskustannuksiin

Voimalaitoksen kohdalla 690 V:n jännitetasolle ei saatu kilpailukykyistä vaihtoehtoa, koska vertailussa käytetty laiva oli niin pienitehoinen, ettei laitetoimittajalta löytynyt tällä hetkellä mallistosta hyvin sopivaa generaattoria eikä potkurimoottorin taajuusmuuttajaa. Voimalaitoksen laitteiden hinta olisi noussut käytettäessä 3 300 V:n jännitettä noin 500 000 euroa. Hinnan nousu on niin suuri, etteivät halventuvat kaapelointikustannukset riitä kattamaan siitä millään lähitulevaisuudessa odotettavalla kuparin maailmanmarkkinahinnalla kuin vain murto-osan.

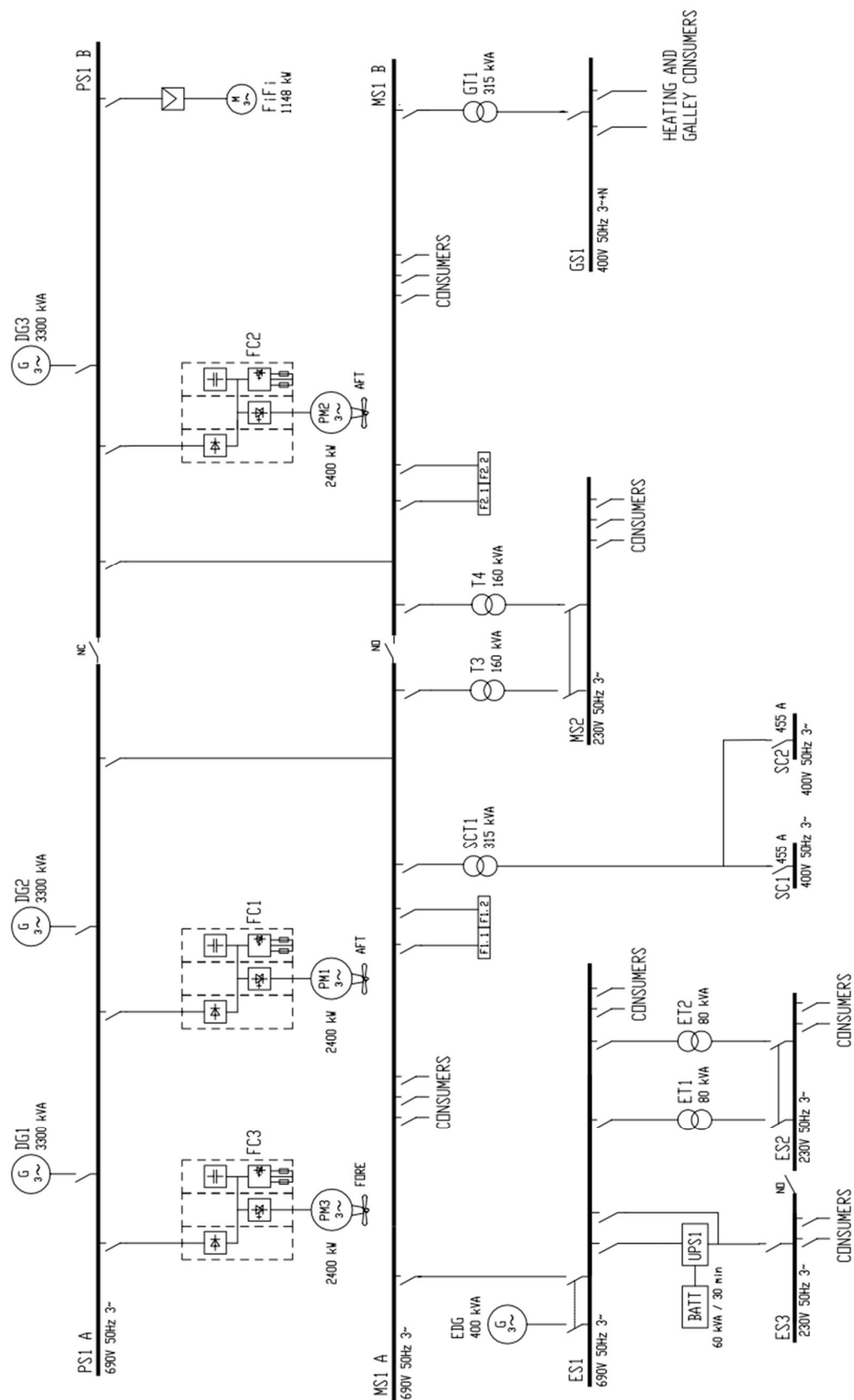
Asiasta ei tule kuitenkaan vetää liian jyrkkiä johtopäätöksiä, sillä maailmassa on useita mahdollisia laitetoimittajia ja on mahdollista, että vertailulaivan teholuokkaan löytyisi

mitoitukseltaan paremmin sopiva vaihtoehto 3 300 V:n jännitteelle. Lisäksi jos kyseessä olisi todellinen laivaprojekti, saattaisi vertailussa käytetty laitetoimittaja pystyä hankkimaan osan laitteista halvemmalla muilta laitetoimittajilta, jolloin ero eri jännitevaihtoehtojen välillä kutistuisi merkittävästi. Kaiken kaikkiaan 690 V jännitetason valintaa voidaan kuitenkin pitää onnistuneena.

## **7 Päätaulujen toteuttaminen yhteisellä jännitteellä**

Pääjakelukaavio joudutaan tarjousvaiheessa usein suunnittelemaan ja päättämään kiireessä, jolloin ratkaisu on todennäköisesti tarpeeseen soveltuva, mutta ei paras mahdollinen. Tavallisesti soveltuva pääjakelukaavio kopioidaan aiemmasta vastaavasta projektista ja muokataan vastaamaan tulevan laivan erityistarpeita. Kiire kuitenkin laskee motivaatiota ja mahdollisuuksia erilaisten ratkaisujen hakemiseen sekä suurien muutoksien suunnitteluun ja toteuttamiseen. Myös laitetoimittajilla saattaa olla oma mielipiteensä sähköntuotannon ja jakelun toteuttamisesta, mutta on kuitenkin syytä muistaa, että laitetoimittajien ja telakan intressit saattavat poiketa jonkin verran.

Paperilla pääjakelukaavion muuttaminen on helppoa, mutta myöhemmässä vaiheessa valittu malli luo pohjan jota suunnittelu joutuu noudattamaan. Ei ole olemassa yhtä oikeaa tapaa rakentaa pääjakelukaaviota, joten asiaan tulisi kiinnittää aika ajoin huomiota. Esimerkiksi jos voimanjakelu ja voimalaitos toteutettaisiin samalla jännitteellä, olisi teknisesti mahdollista yhdistää verkot paremmin keskenään, jolloin sähkönjakelusta tulisi yksinkertaisempi ja osa jakeluverkon komponenteista voitaisiin jättää pois. Yksinkertaisempi verkko olisi todennäköisesti halvempi rakentaa. Lisäksi tällöin mahdollisten vikaantuvien osien määrä vähenee, joka parantaa luotettavuutta ja vähentää ylläpito-kustannuksia. Kuvassa 13 (ks. seur. s.) esitetään yksinkertaistettu versio NB508 sähkönjakeluverkosta.



Kuva 13. Yksinkertaistettu malli NB508 sähköverkosta

Ero toteutettuun malliin verrattuna on voimanjakeluverkon toteuttaminen voimalaitoksen tavoin 690 V:n jännitteellä ja MS1-taulun yhdistäminen PS1-tauluun ilman välissä olevia muuntajia. Käyttämällä voimalaitoksessa ja voimanjakelussa samaa jännitettä voidaan verkosta jättää pois kaksi laivan isointa jakelumuuntajaa, sekä kaksi suurta katkaisijaa päätaulujen väliltä. Kuvasta on myös poistettu laivan satamageneraattori, koska se ei ole välttämätön. Satamassa sähköä voidaan tuottaa tarvittaessa laivan hätägeneraattorilla, tosin asia tulee ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Jos laivan hätägeneraattoria käytetään sähkönsyöttöön satamassa, tulee erityistä huomiota kiinnittää suojalaitteiden selektiivisyyteen. Lisäksi hätägeneraattorin automatiikalla tulee olla satamakäyttöä varten oma toimintatila.

Yksinkertaistetussa mallissa on myös omat haittapuolensa. Päätaulujen välisten muuntajien pois jättäminen nostaa MS1-taulun oikosulkuvirtoja, joka vaikuttaa katkaisijoiden valintaan. Käytettäessä voimanjakelussa 690 V:n jännitettä, laskevat kaapelointikustannukset kuitenkin kompensoivat katkaisijoiden nousevia hankintahintoja. Muuntajien poistamisen jälkeen päätaulujen välillä olisi galvaaninen yhteys, jolloin erityisesti korkeataajuuksien sähkönhäiriöiden määrä voimanjakelussa kasvaisi. Tämänlaiset häiriöt ovat erityisen haitallisia herkille elektronisille sähkölaitteille. Herkkiä sähkölaitteita ei kuitenkaan juuri kytketä suoraan MS1-tauluun, ja tarvittaessa häiriöiden määrää voidaan vähentää suodattimien avulla. Verkkojen galvaaninen yhdistäminen saattaa myös tuoda ylimääräisiä haasteita maavuotovalvontaan.

Esitetystä vaihtoehdosta keskusteltiin laitetoimittajan sekä luokituslaitoksen asiantuntijoiden kanssa, ja malli todettiin toteuttamiskelpoiseksi. Mallissa on yllä esitetyt ongelmat, mutta mikään niistä ei ole ylitsepääsemätön. Lisäksi ilman suuria yllätyksiä esitetyn vaihtoehdon mukainen sähköverkko olisi todennäköisesti halvempi toteuttaa, kuin nyt valittu ratkaisu.

## 8 Yhteenveto

Insinööriytyössä tutkittiin jännitetason valinnan merkitystä kustannusten muodostumiseen, ja millä jännitetasoilla vertailussa käytetyn NB508-laivan kaltainen sähköverkko olisi kannattavaa rakentaa.

Työssä todettiin työkustannusten muodostavan kuparin maailmanmarkkinahinnasta riippuen noin kolmanneksen kaapeloinnin kokonaiskustannuksista. Jännitetaso nosto 400 V:sta 690 V:iin pienentäisi työkustannuksia noin 28 %, säästön syntyen lähinnä isoista pää- ja hätäjakelutauluista. Voimalaitoksessa 3 300 V jännitteen käyttäminen 690 V:n sijaan olisi laskenut työkustannuksia noin 33 %.

Kaapeloinnin materiaalikustannusten osalta todettiin kaapeleiden kustannusten olevan 690 V:lla hieman yli 40 % pienemmät kuin 400 V:lla. Käytettäessä samaa kaapelityyppiä kaapeleiden materiaalikustannukset alenivat pienjännitteellä samassa suhteessa kuin jännitetasoa nostettiin. Voimalaitoksessa käytettäessä 690 V:n jännitettä kaapeloinnin materiaalikustannukset riippuvat erittäin voimakkaasti kuparin maailmanmarkkinahinnasta. Sen sijaan käytettäessä 3 300 V:n jännitettä kuparin hinnalla on vain hyvin pieni vaikutus materiaalikustannuksiin. Voimalaitoksen kaapeloinnin materiaalikustannusten ero eri jännitetasojen välillä on esitetty voimalaitoksen materiaalikustannukset - kappaleessa kuvassa 8 (ks. s. 38).

Voimanjakelussa 690 V:n jännitteellä kaapeloinnin kokonaiskustannukset pienenevät hieman yli kolmanneksen verrattuna 400 V:n jännitteeseen. Voimalaitoksessa kustannusero riippuu merkittävästi kuparin maailmanmarkkinahinnasta. Säästöjä on esitelty tarkemmin kuvissa 9 - 11 (ks. s. 39 - 41).

Laitekustannuksissa jännitetasolla ei todettu olevan juurikaan merkitystä jakelumuntajien hintaan. Voimanjakelun MS1- ja ES1-taulujen hinnat nousivat noin 15 % siirryttäessä 400 V:n jännitteestä 690 V:n jännitteeseen. Voimalaitoksen kohdalla laitetoimittajalta ei saatu 3 300 V:n jännitteellä kilpailukykyistä tarjousta 690 V:n vaihtoehdolle, koska laitetoimittajalta ei itseltään löytynyt sopivasti mitoitetuja generaattoreita eikä potkurimoottoreiden taajuusmuuttajia vertailussa käytettyyn laivaan. Voimalaitoksen laitekustannusten kannalta on tärkeää, etteivät laitteet ole ylimitoitettuja.

Siirryttäessä korkeampaan jännitteeseen kaapeleiden tilantarve vähenee, koska tarvittava kaapeleiden poikkipinta-ala ja/tai lukumäärä pienenee. Sähkölaitteiden kohdalla jännitetason nosto saattaa kasvattaa tilantarvetta. MS1- ja ES1-taulujen pituus kasvoi noin kolmanneksen siirryttäessä 400 V:n jännitteestä 690 V:iin, muiden mittojen pysyessä käytännössä samoina. Voimalaitoksen osalta arvioitiin, ettei jännitteellä olisi ollut suurta merkitystä PS1-taulun ulkomittoihin, eikä myöskään laivan päägeneraattoreihin.

Insinööriyössä todettiin, että vertailussa käytetyn NB508-laivan jännitetasojen valinta on taloudellisessa mielessä onnistunut. Tosin käyttämällä sekä voimalaitoksessa että voimanjakelussa 690 V:n jännitettä ja yksinkertaistamalla jakeluverkon rakennetta poistamalla laivasta pääjakelumuuntajat, olisi sähköverkon kustannuksia todennäköisesti mahdollista vielä laskea. Negatiivisina puolina muuntajien poistolle voidaan pitää korkeataajuuksien häiriöiden suurempaa johtumista voimanjakeluun, sekä maavuotovalvonnan vaikeutumista. Yksinkertaistettua jakeluverkkoratkaisua on esitelty luvussa 7.

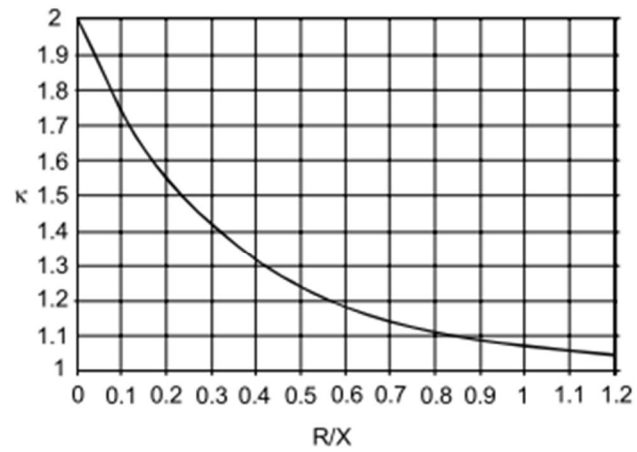
Työssä myös todettiin, ettei laivan satamageneraattori ole välttämätön. Satamageneraattorin sijasta voitaisiin hyödyntää laivan hätägeneraattoria, joka on kaiken lisäksi vertailulaivassa saman tehoinen satamageneraattorin kanssa. Tulevaisuutta ajatellen kannattaisi selvittää olisiko sähköverkkoa mahdollista yksinkertaistaa enemmän, siten että kaikki vaatimukset kuitenkin täyttyisivät. Yleisesti yksinkertaisten ratkaisujen etuina voidaan pitää edullisuutta ja toimintavarmuutta.



## Lähteet

- 1 Borstlap, René & Ten Katen, Hans. 2011. Ships' Electrical systems.
- 2 Rules for Classification of Ships, Electrical Installations. January 2013. Det Norske Veritas.
- 3 ABB:n TTT-käsikirja. 2000.

## Sysäyskerroin



Sysäyskerroimen riippuvuus oikosulkuvirtapiirin  $R/X$ - suhteesta.

Kuva 14. Kuvaaja sysäyskerroimen määrittämiseksi [3]